



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

---

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

# **ESTUDI D'AVALUACIÓ I OPTIMITZACIÓ D'UN SISTEMA D'ENERGY HARVESTING BASAT EN TECNOLOGIA PIEZOELÈCTRICA**

**TREBALL FINAL DE GRAU**

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Autor:** Eduard Gelpí Vallcorba

**Director:** Ernest Bernat Masó

**Data d'entrega:** 10 de Juny de 2019



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

---

**Escola Superior d'Enginyeries Industrial,  
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa**

Titulació:

**Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials**

Alumne (*nom i cognoms*):

**Eduard Gelpí Vallcorba**

Títol de TFG:

**Estudi d'avaluació i optimització d'un sistema d'Energy Harvesting  
basat en tecnologia piezoelèctrica**

Director del TFG:

**Bernat Masó, Ernest**

Convocatòria del lliurament del TFG:

**10 de Juny de 2019**

Contingut d'aquest volum: **MEMÒRIA**



## Abstract

Currently, we, as human beings, are realizing the gravity of natural environment conserving and new technologies boosting with which combat climate change. Clean energy generation, it supposes avoiding an irreparable problem and hindering our own life.

For this reason, it is proposed to use the piezoelectric effect, through which, from a mechanical effort, a potential difference is achieved.

After many studies on the viability of piezoelectric materials around the world, it has not been possible to explode such unique properties as those that characterize them, in order to market them. Therefore, this document it is focused on optimizing a prototype (mechanic and electric) based on the flexion of piezoelectric patches when a vehicle passes over it, and so, harvest electricity energy

To summarize, it is implemented an Energy Harvesting system capable of capturing energy that remains in the environment, without having to be transported and which in any case, generates CO<sub>2</sub> emissions (during the operation phase of the project).

## Abstracte

Actualment, els éssers humans ens estem adonant de la importància de la conservació del medi ambient i de la potenciació de les noves tecnologies amb les quals combatre el canvi climàtic. La generació d'energia neta, suposa evitar un problema irreparable i dificultar la nostra pròpia vida.

Per aquest motiu, es proposa utilitzar l'efecte piezoelèctric, a través del qual, a partir d'un esforç mecànic, s'aconsegueix una diferència de potencial.

Després de molts estudis sobre la viabilitat de materials piezoelèctrics arreu del món, no ha estat possible explotar les propietats tan singulars com les que els caracteritzen, per poder comercialitzar-los. Per tant, aquest document se centra en l'optimització d'un prototip (mecànic i elèctric) basat en la flexió dels transductors piezoelèctrics quan un vehicle hi passa per sobre i, per tant, recollir l'energia elèctrica.

Resumidament, s'implementa un sistema d'"Energy Harvesting" capaç de capturar l'energia que roman en el medi ambient, sense haver de ser transportat i que, en cap cas, genera emissions de CO<sub>2</sub> (durant la fase d'explotació del projecte).

## Índex de continguts

<b>1. Prefaci .....</b>	<b>- 8 -</b>
<b>2. Introducció .....</b>	<b>- 9 -</b>
<b>3. Objectius .....</b>	<b>- 10 -</b>
<b>4. Abast .....</b>	<b>- 11 -</b>
<b>5. Estat de l'art .....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>5.1. Referències.....</b>	<b>- 12 -</b>
<b>5.2. Piezoelectricitat.....</b>	<b>- 12 -</b>
5.2.1. Introducció .....	- 12 -
5.2.2. Història .....	- 13 -
5.2.3. Materials .....	- 14 -
5.2.4. Aplicacions i previsions de futur .....	- 16 -
5.2.5. Models d'operació .....	- 19 -
<b>5.3. Energy Harvesting .....</b>	<b>- 22 -</b>
<b>5.4. Sistema mecànic del prototip real.....</b>	<b>- 24 -</b>
5.4.1. Diferències respecte el prototip anterior .....	- 24 -
5.4.2. Sistema captador d'energia.....	- 27 -
5.4.3. Sistema de transmissió.....	- 31 -
5.4.4. Sistema generador d'energia.....	- 34 -
5.4.5. Càlculs teòrics del sistema mecànic del prototip real.....	- 37 -
<b>5.5. Descripció del sistema elèctric i l'emmagatzematge d'energia.....</b>	<b>- 48 -</b>
<b>5.6. Resum del sistema electrònic.....</b>	<b>- 60 -</b>
<b>6. Propostes de millora i optimització .....</b>	<b>- 62 -</b>
<b>6.1. Estudi de l'eficiència en diferents casos .....</b>	<b>- 65 -</b>
6.1.1. Optimització de la lleva .....	- 72 -
6.1.2. Càlculs teòrics dels paràmetres de lleva .....	- 75 -
6.1.3. Disseny suport de la lleva .....	- 78 -
<b>6.2. Optimització teòrica de la relació de la palanca .....</b>	<b>- 79 -</b>
<b>6.3. Optimització teòrica del volant d'inèrcia.....</b>	<b>- 80 -</b>
<b>6.4. Optimització teòrica del sistema elèctric.....</b>	<b>- 81 -</b>
<b>6.5. Optimització per la implementació a la via .....</b>	<b>- 90 -</b>
<b>7. Planificació desitjada i preparació dels experiments pràctics .....</b>	<b>- 93 -</b>
<b>8. Resultats obtinguts a la part pràctica .....</b>	<b>- 97 -</b>
<b>8.1. Condicions controlades a la UPC .....</b>	<b>- 97 -</b>
8.1.1. Sol·licitació forçada .....	- 97 -
8.1.2. Vibració lliure.....	- 101 -
<b>8.2. Mecanisme complet a GMF.....</b>	<b>- 103 -</b>
<b>9. Resum del pressupost .....</b>	<b>- 106 -</b>
<b>10. Conclusions i propostes de millora .....</b>	<b>- 107 -</b>
<b>11. Bibliografia .....</b>	<b>- 111 -</b>
11.1. Textos i continguts .....	- 111 -
11.2. Il·lustracions i gràfiques.....	- 114 -
11.3. Taules.....	- 116 -

## Índex d'il·lustracions

<i>Il·lustració 1: Sistemes de captació d'energia sostenible. Font [1]</i>	- 8 -
<i>Il·lustració 2: Sensor piezoelèctrics per augmentar seguretat vial. Font [2]</i>	- 10 -
<i>Il·lustració 3: Esquema de l'efecte directe i invers respectivament. Font: [3]</i>	- 13 -
<i>Il·lustració 4: Germans Jacques i Pierre Curie. Font [4]</i>	- 14 -
<i>Il·lustració 5: Gabriel Lippman. Font [5]</i>	- 14 -
<i>Il·lustració 6: Estructura monocristal·lina. Font [6]</i>	- 15 -
<i>Il·lustració 7: Possibles estructures dels piezo-polímers o piezo-compostos. Font: [7]</i>	- 15 -
<i>Il·lustració 8: Procés de polarització dels piezoelèctrics sintètics. Font: [8]</i>	- 16 -
<i>Il·lustració 9: Transductor piezoelèctric per fer ecografies. Font: [9]</i>	- 17 -
<i>Il·lustració 10: Passos per la formació d'imatge en una ecografia. Font: [10]</i>	- 17 -
<i>Il·lustració 11: Disseny d'un encenedor. Font: [11]</i>	- 17 -
<i>Il·lustració 12: Sensor piezoelèctric per evitar robatoris. Font: [12]</i>	- 18 -
<i>Il·lustració 13: Funcionament injector piezoelèctric. Font: [13]</i>	- 18 -
<i>Il·lustració 14: Mode d'operació 31 (flexió). Font: [16]</i>	- 20 -
<i>Il·lustració 15: Modes de flexió d'una biga en voladís. Font: [17]</i>	- 21 -
<i>Il·lustració 16: Mode d'operació 33 (compressió). Font: [18]</i>	- 21 -
<i>Il·lustració 17: Mode d'operació 15 (cisalla). Font: [19]</i>	- 22 -
<i>Il·lustració 18: Emmagatzematge d'energia en Energy Harvesting. Font: [20]</i>	- 23 -
<i>Il·lustració 19: Sistemes Energy Harvesting. Font: [21]</i>	- 23 -
<i>Il·lustració 20: Mecanisme global implementat. Font pròpia</i>	- 24 -
<i>Il·lustració 21: Prototip implementat a GMF. Font pròpia</i>	- 24 -
<i>Il·lustració 22: Disseny esquemàtic de sistema captació d'energia del prototip inicial. Font [6]</i>	- 24 -
<i>Il·lustració 23: Disseny real de sistema captació d'energia del prototip inicial. Font [6]</i>	- 24 -
<i>Il·lustració 24: Biga d'accionament amb rampa. Font pròpia</i>	- 25 -
<i>Il·lustració 25: Biga desmuntada amb detall de la palanca. Font pròpia</i>	- 25 -
<i>Il·lustració 26: Sistema transmissió actual. Font pròpia</i>	- 26 -
<i>Il·lustració 27: Sistema de transmissió de l'antic prototip. Font [6]</i>	- 26 -
<i>Il·lustració 28: Anterior sistema generador d'energia. Font [6]</i>	- 27 -
<i>Il·lustració 29: Generador del nou prototip. Font pròpia</i>	- 27 -
<i>Il·lustració 30: Elements que formen part del sistema mecànic. Font pròpia</i>	- 28 -
<i>Il·lustració 31: Disseny del sistema de captació d'energia. Font pròpia</i>	- 28 -
<i>Il·lustració 32: Perfil biga UPN. Font: [24]</i>	- 29 -
<i>Il·lustració 33: Paràmetres característics biga UPN 200 (última de totes). Font: [24]</i>	- 29 -
<i>Il·lustració 34: Possible conjunt de 4 molles per subjectar la plataforma. Font: [25]</i>	- 30 -
<i>Il·lustració 35: Efecte palanca. Font: [26]</i>	- 31 -
<i>Il·lustració 36: Estructura del sistema de transmissió. Font pròpia</i>	- 31 -
<i>Il·lustració 37: Volant d'inèrcia d'un motor. Font: [27]</i>	- 33 -
<i>Il·lustració 38: Volant d'inèrcia del prototip. Font pròpia</i>	- 33 -
<i>Il·lustració 39: Exemple típic d'una lleva. Font: [28]</i>	- 34 -
<i>Il·lustració 40: Lleva amb la qual es treballa. Font pròpia</i>	- 34 -
<i>Il·lustració 41: Sistema generació energia. Font pròpia</i>	- 35 -
<i>Il·lustració 42: Diagrama d'una flexió incorrecte. Font pròpia</i>	- 36 -
<i>Il·lustració 43: Encastament perfecte ànima – làmina. Font pròpia</i>	- 36 -
<i>Il·lustració 44: Encaix amb folgança. Font pròpia</i>	- 37 -
<i>Il·lustració 45: Diagrama d'una flexió correcta. Font pròpia</i>	- 37 -
<i>Il·lustració 46: Disseny de forces en el sistema de captació. Font pròpia</i>	- 37 -
<i>Il·lustració 47: Representació del diagrama a flexió de les làmines. Font pròpia</i>	- 40 -
<i>Il·lustració 48: Forces que creen moment en el sistema transmissor. Font pròpia</i>	- 46 -
<i>Il·lustració 49: Força resistent que no crea moment (real). Font pròpia</i>	- 47 -
<i>Il·lustració 50: Força generadora de moment (suposada). Font pròpia</i>	- 47 -

<i>Il·lustració 51: Passos esquemàtics que segueix el circuit de condicionament. Font: [6]</i>	- 49 -
<i>Il·lustració 52: Etapes del sistema elèctric. Font: [30]</i>	- 50 -
<i>Il·lustració 53: Excèntrica i peça "c" per a una sol·licitud cíclica. Font [6]</i>	- 51 -
<i>Il·lustració 54: Metodologia de l'experiment. Font [6]</i>	- 51 -
<i>Il·lustració 55: Esquema Standard interface circuit. Font: [32]</i>	- 51 -
<i>Il·lustració 56: Esquema SCE interface circuit. Font: [32]</i>	- 53 -
<i>Il·lustració 57: Esquema del Paralel SSHI interface circuit. Font: [32]</i>	- 55 -
<i>Il·lustració 58: Esquema del Series SSHI interface circuit. Font: [32]</i>	- 57 -
<i>Il·lustració 59: Diagrama que segueix el sistema electrònic. Font pròpia</i>	- 61 -
<i>Il·lustració 60: Dimensions del transductor utilitzat. Font: [33]</i>	- 63 -
<i>Il·lustració 61: Preparació del cable per una bona soldadura. Font: [34]</i>	- 63 -
<i>Il·lustració 62: Amplitud descrita per una vibració forçada. Font: [37]</i>	- 66 -
<i>Il·lustració 63: Amplitud descrita en una vibració lliure. Font: [36]</i>	- 66 -
<i>Il·lustració 64: Diferents tipus d'amortització lliure. Font: [37]</i>	- 67 -
<i>Il·lustració 65: Esquema del circuit elèctric després del transductor. Font pròpia</i>	- 68 -
<i>Il·lustració 66: Tipus de taula realitzada en Excel per l'estudi d'eficàcia. Font pròpia</i>	- 70 -
<i>Il·lustració 67: Lleva optimitzada. Font pròpia</i>	- 73 -
<i>Il·lustració 68: Distància acotada entre el coixinet i la lleva. Font pròpia</i>	- 73 -
<i>Il·lustració 69: Sistema de damping òptim. Font pròpia</i>	- 75 -
<i>Il·lustració 70: Sistema de damping sobredimensionat. Font pròpia</i>	- 75 -
<i>Il·lustració 71: Estructura del suport de la platina en vibració lliure. Font pròpia</i>	- 78 -
<i>Il·lustració 72: Acoblament entre el suport i la lleva. Font pròpia</i>	- 79 -
<i>Il·lustració 73: Eficàcia ressonant d'un sol grau de llibertat connectada als quatre tipus de circuit. A) Standard. B) SCE. C) SSHI Paralel. D) SSHI Series. Font: [39]</i>	- 87 -
<i>Il·lustració 74: Típica gràfica dels dos circuits SSHI. a) Paralel. b) Series. c) inversió en l'instant de màxim desplaçament. Font: [40]</i>	- 89 -
<i>Il·lustració 75: Esquemàtica del circuit SSHI dividit en 5 blocs basats en la seva funció. Font: [41]</i>	- 90 -
<i>Il·lustració 76: Possibilitat d'implementar en radars de tram. Font: [42]</i>	- 91 -
<i>Il·lustració 77: Exemple de qual amb tecnologia piezoelèctrica, dissenyat per iBump. Font: [43]</i>	- 92 -
<i>Il·lustració 78: Disseny de la connexió elèctrica. Font pròpia</i>	- 96 -
<i>Il·lustració 79: Execució final del generador. Font pròpia</i>	- 96 -
<i>Il·lustració 80: Execució del experiment controlat realitzat a la UPC de Terrassa. Font pròpia</i>	- 97 -

## Índex de gràfiques

Gràfica 1: Quota de mercat segons la utilització l'any 2015 a Corea del Sud, Japó i la Xina. Font: [14]	- 19 -
Gràfica 2: Predicció d'ingressos al mercat de Japó en milions de dollars fins l'any 2025. Font: [14]	- 19 -
Gràfica 3: Predicció d'ingressos al mercat dels EUA en bilions de dollars fins l'any 2025. Font: [15]	- 19 -
Gràfica 4: Estimació de l'evolució de la densitat de potència dels piezoelèctrics fins el 2023. Font: [23]	- 23 -
Gràfica 5: Predicció mercat global dels energy harvester en milers de \$ fins l'any 2024. Font: [22]	- 23 -
Gràfica 6: Senyal rectificada amb pont de díodes. Font: [29]	- 49 -
Gràfica 7: Ones descrites per l'Standard interface circuit. Font: [32]	- 52 -
Gràfica 8: Ones descrites per l'SCE interface circuit. Font: [32]	- 54 -
Gràfica 9: Ones descrites per el Parallel SSHI interface circuit	- 55 -
Gràfica 10: Ones descrites pel Series SSHI interface circuit. Font: [32]	- 57 -
Gràfica 11: Potència recol·lectada a nivell teòric (a) i a nivell experimental (b) en funció de la resistència amb la configuració explicada. Font: [32]	- 59 -
Gràfica 12: Potència de sortida en funció de la resistència per diferents models. Font: [35]	- 64 -
Gràfica 13: Potència de sortida en funció de les condicions d'excitació. Font: [35]	- 64 -
Gràfica 14: Potència de sortida en funció de la freqüència. Font: [35]	- 65 -
Gràfica 15: Ones descrites en una vibració forçada de posició, velocitat i acceleració respectivament. Font: [38]	- 67 -
Gràfica 16: Damping en funció de la longitud. Font pròpia	- 76 -
Gràfica 17: Relació entre l'energia recollida, freqüència d'oscil·lació i numero de transductors. Font pròpia	- 99 -
Gràfica 18: Representació de la força envers freqüència quan l'amplitud és de 0,1 cm. Font pròpia	- 100 -
Gràfica 19: Energia recollida en diferents amplituds d'excitació amb 20 transductors. Font pròpia	- 101 -
Gràfica 20: Representació qualitativa de l'amortització lliure amb una llevea optimitzada. Font pròpia	- 102 -
Gràfica 21: Relació de l'energia recollida i la potència màxima assolida en cadascun dels assajos. Font pròpia	- 104 -



## Índex de taules

Taula 1: Identificació de cada pinyó amb el seu radi. Font pròpia	- 33 -
Taula 2: Molles de la plataforma a comprar. Font {1}	- 39 -
Taula 3: Molla ànima a comprar. Font {2}	- 42 -
Taula 4: Inèrcies del sistema transmissor. Font pròpia	- 45 -
Taula 5: Fórmules Standard interface circuit. Font {3}	- 52 -
Taula 6: Fórmules SCE interface circuit. Font {3}	- 54 -
Taula 7: Fórmules Parallel SSHI interface circuit. Font {3}	- 56 -
Taula 8: Fórmules del Series SSHI interface circuit. Font {3}	- 58 -
Taula 9: Correspondència entre les corbes i el circuit utilitzat. Font pròpia	- 59 -
Taula 10: Especificacions del P-876.A12. Font {4}	- 63 -
Taula 11: Relació efectivitat amb freqüència i resistència en excitació forçada i platina d'alumini. Font pròpia	- 70 -
Taula 12: Relació efectivitat amb freqüència i resistència en excitació forçada i platina de polímer. Font pròpia	- 71 -
Taula 13: Relació de l'efectivitat amb la resistència, gruix i amplitud en excitació lliure i platina d'alumini. Font pròpia	- 71 -
Taula 14: Relació de l'efectivitat amb la resistència, gruix i amplitud en excitació lliure i platina de polímer. Font pròpia	- 72 -
Taula 15: Damping en funció de la longitud de la platina d'alumini. Font pròpia	- 76 -
Taula 16: Valors de tensió i potència teòrics en funció del factor de qualitat i el numero de pedaços pel circuit SSHI Parallel. Font pròpia	- 83 -
Taula 17: Valors de tensió i potència teòrics obtinguts després de calcular la resistència òptima i en funció del factor de qualitat pel circuit SSHI Parallel. Font pròpia	- 84 -
Taula 18: Valors de tensió i potència teòrics en funció del factor de qualitat i el numero de pedaços pel circuit SSHI Series. Font pròpia	- 86 -
Taula 19: Valors de tensió i potència teòrics obtinguts després de calcular la resistència òptima i en funció del factor de qualitat pel circuit SSHI Series. Font pròpia	- 86 -
Taula 20: Resistències òptimes a comprar segons el circuit. Font {5} i {6}	- 87 -
Taula 21: Càlcul de les capacitats dels condensadors en cada circuit. Font pròpia	- 88 -
Taula 22: Característiques del condensador a comprar. Font {7}	- 89 -
Taula 23: Energia recol·lectada amb 1 transductor al excitar-lo forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia	- 98 -
Taula 24: Energia recol·lectada amb 2 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia	- 98 -
Taula 25: Energia recol·lectada amb 10 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia	- 98 -
Taula 26: Energia recol·lectada amb 20 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia	- 99 -
Taula 27: Energia recol·lectada amb 20 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,2 cm. Font pròpia	- 100 -
Taula 28: Energia recol·lectada en oscil·lació lliure a diferents amplitud per un sol impuls. Font pròpia	- 101 -
Taula 29: Energia recol·lectada en oscil·lació lliure en informe qualitatiu. Font pròpia	- 102 -
Taula 30: Resultats de l'energia del conjunt de proves realitzades amb el prototip final. Font pròpia	- 103 -
Taula 31: Costos finals del projecte. Font pròpia	- 106 -

## 1. Prefaci

Després de molts estudis sobre la viabilitat dels materials piezoelèctrics arreu del planeta, no s'ha pogut arribar a explotar unes propietats tan singulars com les que els caracteritzen per tal d'arribar a comercialitzar-los. Personalment, m'agradaria aportar una mica més de llum sobre el tema i intentar que una tecnologia sostenible com aquesta, pugui arribar a ser implementada per tal de substituir altres que no juguen tan a favor del medi ambient.

És evident que els éssers humans, hem de canviar molts hàbits que fins ara no s'havien tingut en compte, abans de què les alteracions que està patint el planeta siguin irreversibles. Cal cridar a l'optimisme i aconseguir que cadascú, amb petites accions afavoreixi l'evolució necessària pel propi bé comú.

Espero que aquest treball sigui profitós i aconseguir que les empreses es plantegin el fet d'utilitzar energia piezoelèctrica en els màxims àmbits i aplicacions possibles. També m'agradaria agrair al professor Lluís Gil, qui em va oferir executar aquest projecte, a l'Ernest Bernat, el meu tutor que m'ha ajudat i encaminat durant el quadrimestre i a l'empresa GMF<sup>1</sup> que ha fet possible la fabricació i modificació del prototip.



*Il·lustració 1: Sistemes de captació d'energia sostenible. Font [1]*

---

<sup>1</sup> GMF: Empresa de COMSA, les sigles signifiquen Gestión de Maquinaria Ferroviaria i té seu a Constantí

## 2. Introducció

Actualment, són molts els grups d'investigadors i científics que alerten a la societat de la necessitat de capgirar la situació global del planeta per causes com l'escalfament global, danys ambientals, canvi dels ecosistemes... totes elles generades bàsicament per l'enorme producció d'energia, que cedeix  $\text{CO}_2$  i altres gasos nocius per a l'atmosfera. Un altre factor important és la sobre-població humana que requereix d'aquesta energia per viure, però les energies renovables i sostenibles poden ser un element crucial en el esdevenir de la nostra espècie, ja que seria possible generar nivells d'energia suficients però d'una forma molt més neta i eficient (sense ser nociu). Gràcies a tots aquests enginyers i investigadors, cada vegada s'està trobant nous mètodes per captar energia, ja sigui tèrmica, mecànica, química, electromagnètica...etc.

El treball que ens ocupa doncs en aquest projecte, es basa en la línia exposada anteriorment: captar energia generada, transformar-la i després administrar-la de forma adient. Més concretament, es posa èmfasi en l'aprofitament mecànic i la posterior conversió a electricitat. Com bé indica el títol del document, s'utilitzarà tecnologia piezoelèctrica, la qual ens permetrà desenvolupar un sistema intel·ligent per a obtenir energia de la forma més eficient possible.

L'estudi planteja l'obtenció d'energia a través del moviment creat per un vehicle i treure-li profit per l'enllumenat de la via pública. Al passar un cotxe sobre l'asfalt, produeix una deformació sobre aquest que, mitjançant els materials piezoelèctrics i una unitat elèctrica, farà possible l'encesa dels panells il·luminadors. Això implica una major visió de les senyalitzacions i per tant un augment en la seguretat vial, a més, l'energia emmagatzemada podria donar pas a altres aplicacions com per exemple escalfar la calçada en zones amb tendència a baixes temperatures (risc de congelació), o simplement emmagatzemar energia. El fet que sigui "Energy Harvesting" significa que l'energia es transmet des del mateix punt on es vol utilitzar evitant doncs grans obres per cablejat (i els seus costos) i fent viable les seves aplicacions a zones remotes i difícils d'arribar, per on probablement no hi circuli un gran nombre de cotxes.

Per tant, el disseny que es vol reproduir seguint els treballs desenvolupats per alumnes precursors de la UPC de Terrassa, és un prototip capaç de convertir el més eficientment possible la força generada per un cotxe, a energia lumínica gràcies al voltatge creat pels piezoelèctrics i al seu posterior emmagatzematge, que se cedeix intel·ligentment.

### 3. Objectius

L'objectiu principal és estudiar i optimitzar un prototip ja dissenyat per a la il·luminació vial a partir de materials piezoelèctrics que treballen a flexió.

Es busca poder executar l'invent de manera que capti el màxim d'energia de l'automòbil desplaçat i utilitzi aquesta energia emmagatzemada de forma intel·ligent quan les condicions de conducció siguin adverses.

Es calculen valors teòrics tot comparant-los amb els reals obtinguts, i partir d'aquí s'intenta valorar els paràmetres a modificar perquè el projecte operi en perfectes condicions. D'aquesta manera, es pretén aportar més informació sobre com treballen aquest tipus de materials i en les condicions que funcionen de forma òptima per tal que sigui realitzable i generi l'energia demandada.

L'estudi se centra primordialment amb el conjunt mecànic i elèctric, que són els fonamentals perquè aquesta tecnologia sigui efectiva. També es procura calcular pressupostos per trobar la forma econòmicament viable d'instal·lar-los i mantenir-los en un estat de funcionament el més llarg possible, evitant futures problemàtiques.



*Il·lustració 2: Sensor piezoelèctrics per augmentar seguretat vial. Font [2]*

## 4. Abast

El treball es durà a terme de mitjan de febrer fins a finals de juny, i segons els termes comentats prèviament, l'abast serà:

Restablir o variar formes o mecanismes per tal de millorar el sistema mecànic, que es calcularà numèricament així com relacions representades en plànols, gràfics o taules. Se seguirà el mateix procediment pel cas elèctric i s'explicarà els requisits per l'assemblatge.

Treballar paral·lelament amb l'empresa de Comsa GMF, que serà la que s'encarregarà de la construcció del prototip i execució dels plànols (que seran introduïts com annexes en un document a part). Serà indispensable una bona comunicació i coordinació per tal que ambdues parts tinguem els mateixos objectius i els resultats siguin òptims, però cal remarcar que, la producció del prototip dependrà completament de l'empresa tarragonina, i des de Terrassa només s'haurà d'introduir els pedaços piezoelèctrics.

Millorar la selecció d'elements o materials que formin part de l'aparell, ja siguin els propis piezoelèctrics o els components de transmissió. S'estudiarà les propietats necessàries valorant costos i nivells de toleràncies establerts per la universitat.

Realitzar una prova experimental (com a mínim) del sistema mecànic amb la conversió elèctrica, d'on s'obindrà resultats necessaris per l'extracció de conclusions i les conseqüents millores proposades.

Es farà un predicció dels costos que suposa dur a terme aquest projecte, introduint una taula de pressupostos finals tenint en compte tots els factors.

Donat que el treball estudia un nou disseny de prototip amb molts matisos mecànics a acotar i el temps és limitat, no s'aprofundirà en el sistema electrònic, tant sols s'explicarà la seva funció i els elements pels quals està compost.

Realització d'un mapa conceptual del projecte, que quedarà adjuntat a l'últim apartat dels annexes (que és recomanable mirar abans de començar amb la memòria).

Per tots aquells temes en els quals no es pugui aprofundir o no sigui possible la verificació a nivell pràctic, al final del projecte es deixarà constància de tots ells i dels passos a seguir per futurs alumnes interessats en continuar la recerca.

## 5. Estat de l'art

### 5.1. Referències

En aquest apartat s'exposen les diferents referències bibliogràfiques utilitzades durant el treball. S'adjunten doncs projectes realitzats anteriorment per alumnes de la UPC i que han estat importants en la implementació del projecte, i que defineixen clarament l'estat actual en què es troben els piezoelèctrics dins del marc estudiat.

- Projecte d'execució d'una prova pilot de generació elèctrica amb elements piezoelèctrics mitjançant el pas de vehicles.
- Estudi, optimització i ús aplicat de l'energia elèctrica generada per un sistema mecànic d'excitació d'elements piezoelèctrics.
- Estudio para la implementación de un sistema de gestión de energía para la iluminación de señalización vial a partir de la energía generada mediante elementos piezoeléctricos.
- Estudio del circuito de acondicionamiento y almacenamiento de la señal eléctrica generada por un elemento a flexión en función de la excitación mecánica.

### 5.2. Piezoelectricitat

#### 5.2.1. Introducció

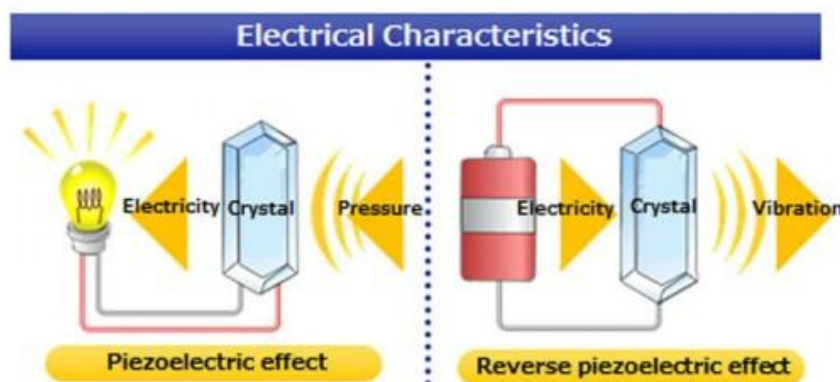
El nom que pren aquest fenomen ve del grec: "piezin", que significa estrènyer o rebregar, i és la capacitat que tenen alguns materials de generar una diferència de potencial (i per tant generar energia elèctrica) al ser sotmesos a una deformació mecànica. Aquest efecte rep el nom de piezoelectricitat directe.

Aquest fet es du a terme perquè, al rebre una tensió mecànica, s'adquireix una polarització elèctrica de la massa i apareixen carregues elèctriques a la seva superfície. El mòdul de força mecànica que pateixi el piezoelèctric, serà directament proporcional a la diferència de potencial generada, és a dir, quanta més deformació, també incrementarà la diferència de voltatge; i en els casos que vibri de manera més o menys estable a la freqüència de ressonància, l'amplitud de vibració produirà una tensió proporcional.(1)

També és possible l'efecte invers: al induir-lo a un camp elèctric extern, es pot aconseguir la seva deformació, encara que aquesta serà molt petita. Per tant es pot afirmar que la piezoelectricitat és un fenomen reversible i que, en el cas de treballar de

forma inversa, al deixar de sotmetre el cristall al camp elèctric, aquest tornarà al seu estat original.

Generalment els materials que pateixen aquest efecte són cristalls o elements ceràmics, que poden ser naturals (quars o turmalina) o sintètics (PZT) i la seva principal característica és que no tenen centre de simetria, fet que provoca que al comprimir-lo o cisellar-lo hi hagi una dissociació dels centres de gravetat de les càrregues positives i negatives. A més, s'ha de tenir present que aquests materials tendeixen a una petita degradació de les seves propietats al llarg del temps, que s'accentua en casos on la temperatura de treball és elevada.(2)



Il·lustració 3: Esquema de l'efecte directe i invers respectivament. Font: [3]

### 5.2.2. Història

El fenomen de la piezoelectricitat directe va ser descoberta per primera vegada l'any 1880 per els germans científics Curie quan estaven estudiant la compressió de diferents materials com el quars, la sal de Rochelle, la canya de sucre, la sacarosa i la turmalina, i va ser amb els dos primers, que van detectar una major diferència de potencial al produir-se l'efecte.

Va ser un any més tard quan el professor i físic luxemburguès Gabriel Lippmann va ser capaç de reproduir els càlculs matemàtics que demostraven l'efecte invers (o també anomenat recíproc). Aquest nou fenomen va ser confirmat experimentalment poc després altre vegada pels propis germans Curie.





*Il·lustració 4: Germans Jacques i Pierre Curie. Font [4]*



*Il·lustració 5: Gabriel Lippman. Font [5]*

Durant les següents dècades, aquests materials van quedar restringits a l'exploració en laboratoris per la curiositat que generava aquest efecte. I l'any 1910, un altre físic però en aquest cas alemany, el senyor Voldemar Voigt va publicar un llibre on representava el comportament de 20 tipus de materials piezoelèctrics després d'un intens estudi.

Però va ser a partir de la Primera Guerra Mundial quan se'ls hi va trobar aplicacions pràctiques: ús de piezoelèctrics per sonars amb gran poder militar. Aquests elements es van fer servir per detectar la direcció dels submarins enemics gràcies a les ones sonores emeses, tot i que no eren molt precisos i van haver d'esperar fins a la Segona Guerra Mundial per ser perfeccionats amb cristalls sintètics i realitzar la seva funció de forma efectiva.(3)

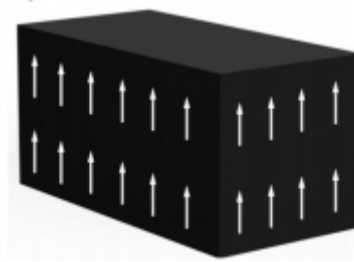
Poc a poc es va anar estudiant i trobant possibles aplicacions, fins al punt que avui en dia l'efecte piezoelèctric és bàsic en tot tipus de tecnologies i aplicacions.

### 5.2.3. Materials

Com ja s'ha comentat amb anterioritat, hi diferents materials capaços de generar una diferència de potencial a partir de la seva deformació, encara que depenent del tipus de material, les propietats són variables. Fonamentalment els podem repartir en 4 categories:(4)

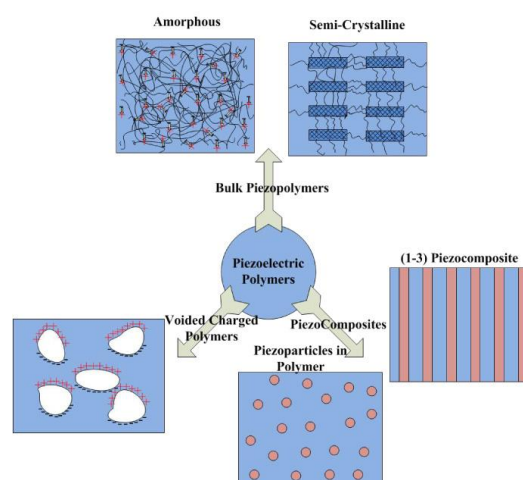
- Monocristal·lins: aquests es defineixen pel fet que presenten una estructura aleatòria amb la mateixa polarització, és a dir, els ions estan distribuïts de forma més o menys equidistant i repartits per tota la seva estructura. Exemple de monocristal·lins serien els cristalls com quars o la turmalita, o elements orgànics com la fusta o els cabells.





Il·lustració 6: Estructura monocristal·lina. Font [6]

- Ceràmics policristal·lins: coneguts també com piezo-ceràmics i són els més utilitzats a l'actualitat. La seva estructura està formada per grans (denominats cristalls ferroelèctrics) que delimiten una regió on predomina una orientació concreta. Però l'organització de cada gra és independent i completament a l'atzar; no segueix cap criteri. El fet que siguin els més sol·licitats és degut a les seves propietats mecàniques: són rígids i dúctils, fets que els permeten un bon acoblament amb les diferents estructures demandades. La ceràmica més empleada s'anomena titanat zirconat de plom (PZT).
- Polímers: també anomenats piezo-polímers i estan formats per llargues cadenes de carburs. Tot i que no arriben a tenir la resposta dels ceràmics, tenen la capacitat de ser més flexibles i tenen altres propietats interessants com: baixa impedància acústica, biocompatibilitat, biodegradabilitat, baix cost i consum d'energia, i fàcil elaboració. El polímer més desenvolupat és el polifluorur de vinilidè (PVDF).



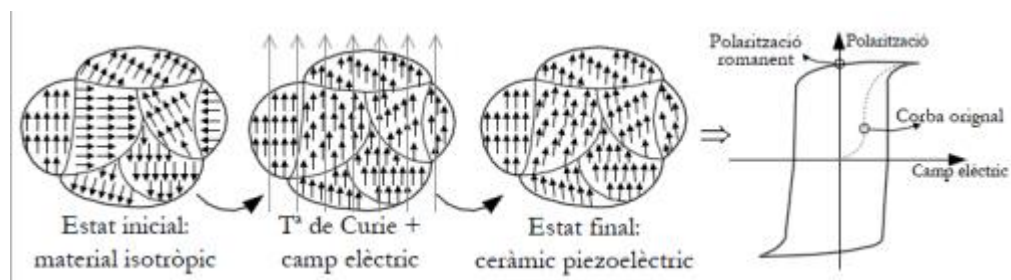
Il·lustració 7: Possibles estructures dels piezo-polímers o piezo-compostos. Font: [7]

- Compostos: Per a augmentar prestacions en aplicacions concretes o amb propietats específiques que no tenen cap dels materials per separat, es combinen entre ells. Normalment s'utilitza una part activa ceràmica i una part passiva de polímer per potenciar les propietats mecàniques de cadascun i obtenint un piezoelèctric combinat amb més prestacions.

D'igual manera, els piezoelèctrics es poden dividir en dos grans grups segons la seva naturalesa:

- Naturals: Com bé indica el seu nom, són materials que posseeixen aquestes propietats originàriament, sense que hagin estat modificats o alterats i amb un efecte piezoelèctric baix; és per això que no s'han arribat a desenvolupar i no tenen cabuda en aplicacions industrials actualment (tan sols en aplicacions puntuals com filtres de banda).
- Sintètics: Aquests components es coneixen industrialment com a piezoelèctrics ferroelèctrics i han estat formats per l'home. Són anàlegs del quars però amb la peculiaritat que l'efecte que pateixen està notablement amplificat, són més versàtils i el seu procés de fabricació resulta més fàcil.

Han de passar per un procés previ que pren el nom de polarització, el qual es basa en l'orientació de les diferents estructures (més o menys) cap a la mateixa direcció; això s'aconsegueix aplicant un fort camp elèctric partint de temperatures superiors a les de Curie fins arribar a temperatura ambient (equivalent a un cicle d'histeresi).



Il·lustració 8: Procés de polarització dels piezoelèctrics sintètics. Font: [8]

#### 5.2.4. Aplicacions i previsions de futur

Durant el pas del temps, es va anar estudiant la piezoelectricitat i trobant possibles aplicacions, fins al punt que avui en dia l'efecte piezoelèctric és bàsic en tecnologies i aplicacions punteres com:

- Ecografies: Una de les tecnologies més usades a nivell mèdic, que es caracteritza per la conversió mecànica produïda pel so a impulsos elèctrics. El

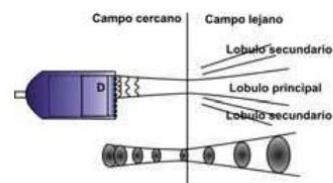
procediment comença quan s'aplica una senyal elèctrica que, a través del transductor, genera un pols i s'espera l'eco del mateix. En qüestió de microsegons, comencen a arribar les ones ultrasòniques reflectides de les diferents parts del cos, creant altre vegada una vibració en el material, que instantàniament genera un corrent elèctric. Finalment s'amplifica aquest senyal elèctric i s'ordena en funció del temps d'arribada per així poder captar una imatge en pantalla.(5),(6)



Il·lustració 9: Transductor piezoelèctric per fer ecografies.  
Font: [9]

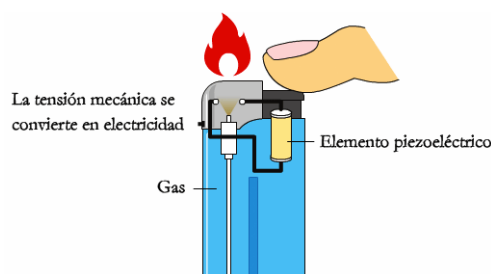
### Formación de la imagen

Onda eléctrica → cristal piezoeléctrico → movimiento → onda de presión (US) → emisión en pulsos (de iguales características A, F, dirección) → pulso resultante



Il·lustració 10: Passos per la formació d'imatge en una ecografia.  
Font: [10]

- Encenedors: Probablement sigui un dels més utilitzats i a la vegada del que més es desconeix el seu funcionament, aquí es fa servir el concepte de l'efecte invers, que quan es prem el botó i es genera una diferència de potencial, s'arriba a crear un arc voltaic (guspira) i gràcies a l'efecte del gas, produir foc.



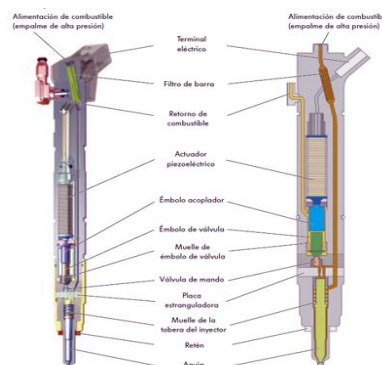
Il·lustració 11: Disseny d'un encenedor. Font: [11]

- Alarmes de seguretat (detecció de presència): La solució amb sensor piezoelèctric consisteix en la col·locació d'un d'aquests aparells a les finestres que es vulgui protegir (com per exemple als aparadors de joieria, bancs o als propis habitatges) i que emetran un senyal elèctric en cas de detectar vibracions d'una certa magnitud (impedint falses alarmes).(7)



Il·lustració 12: Sensor piezoelèctric per evitar robatoris. Font: [12]

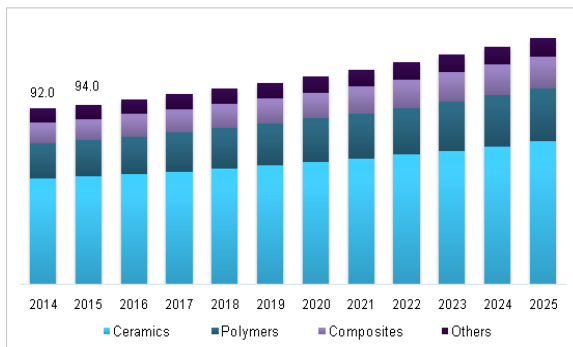
- Injectors de motors: Aquest mètode es fa servir en electrovàlvules de motors de combustió interna. El funcionament és molt senzill: es genera un potencial en un temps concret (quan el combustible ha d'entrar a la càmera) per tal que el material piezoelèctric es contragui i permeti passar al combustible, que deixarà d'estar obturat. Una vegada s'hagi incorporat la quantitat de mescla adient, s'anul·la el camp elèctric, i el material retorna a la forma inicial. D'aquesta manera es pot aconseguir la injecció en ràpides successions, elevada precisió i amb pressions que arriben a excedir els 1800 bars.(8)



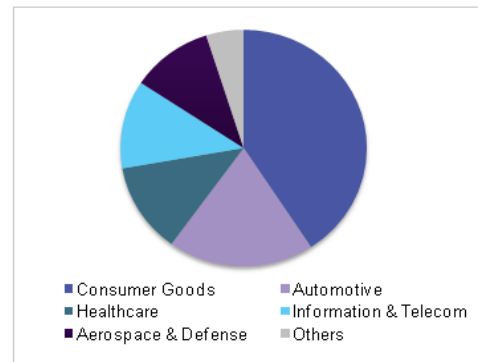
Il·lustració 13: Funcionament injector piezoelèctric. Font: [13]

Com es pot comprovar, els piezoelèctrics tenen un mercat molt extens amb gran varietat de possibilitats encara que no siguin coneguts. Apart dels comentats, hi ha altres aplicacions com: rellotges digitals, sensors, tecnologia de gol pel futbol, càmeres en zones de conflicte armat, micròfons, entre altres.(9)

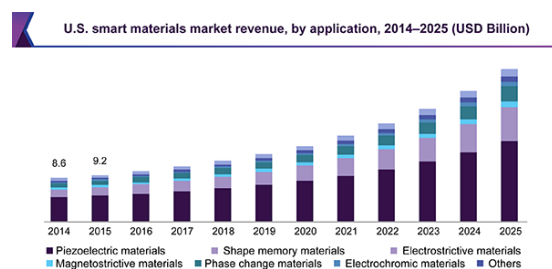
Les prediccions de futur per aquests materials són molt favorables ja que, tenint en compte la tendència de l'automatització de tots els aparells i processos productius i l'evolució de les prestacions dels piezoelèctrics, és d'esperar que les vendes augmentaran exponencialment.



Gràfica 2: Predicció d'ingressos al mercat de Japó en milions de dollars fins l'any 2025. Font: [14]



Gràfica 1: Quota de mercat segons la utilització l'any 2015 a Corea del Sud, Japó i la Xina. Font: [14]



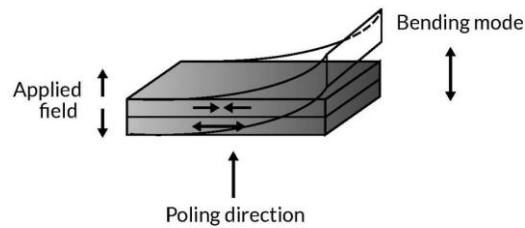
Gràfica 3: Predicció d'ingressos al mercat dels EUA en bilions de dollars fins l'any 2025. Font: [15]

Analitzant els diferents gràfics de la part superior, es pot apreciar com tant als EUA com al Japó hi ha un increment considerable (sobretot a Amèrica) en el mercat dels piezoelèctrics, i es preveu que els més utilitzats siguin els compostos ceràmics. Això és degut a que els propers anys a Europa, es pretén implementar sistemes d'evitació de col·lisions de baixa velocitat i sistemes d'assistència de conductors per a tots els vehicles (s'estima un increment del 3,1% en el sector de l'automoció de l'any 2016 al 2025).(10)

### 5.2.5. Models d'operació

Existeixen moltes maneres d'excitar el material, però en aquest projecte s'estudia les que s'utilitzen principalment, que ens són 3. Totes elles prenen el nom següent un patró, que es regeix per les direccions en què s'aplica el camp elèctric (primer subíndex) i la deformació mecànica (segon subíndex):(11),(12),(13)

- ❖ Mode 31: Aquest primer mode és amb el que es basa aquest treball i és el més emprat en mètodes de recol·lecció d'energia. És un sistema simple equivalent al d'una biga en voladís que, a l'aplicar una carga a l'extrem, suposa una deformació a flexió de tota l'estructura i provoca la polarització de l'altre extrem encastat.



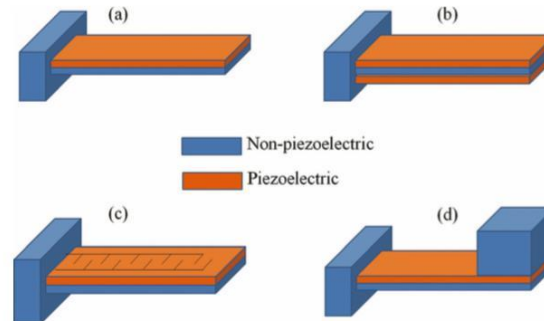
Il·lustració 14: Mode d'operació 31 (flexió). Font: [16]

Com s'ha comentat, aquest mode és un dels més estudiats per sistemes de recollida d'energia, i és per això que s'han dissenyat diferents estratègies per arribar a una captació òptima d'energia. Dins d'aquest mode doncs, tenim altres submodes que es comenten a continuació:

- Mode unimorf: Es tracta de l'esquema més simple i consta només d'un elèctrode instal·lat a la barra oscil·lant. Tant el unimorf com el bimorf (explicat a continuació) poden produir grans deformacions, però la configuració unimorfa és més adient en casos on s'estudiï magnituds de càrrega resistiva petites i baixes freqüències.
- Mode bimorf: Com és previsible, aquest cas és igual que el primer però està compost per dos transductors, situats a cada cara de la biga. Amb aquest format es pretén doblar la potència aprofitant la geometria del suport i del moviment més o menys simètric creat. Per tal que aquest procés sigui òptim, és necessari excitar la barra a elevades freqüències i altes càrregues.  
No pot passar per alt el fet que cada element piezoelèctric generarà un voltatge d'igual valor absolut però amb sentit contrari, ja que quan un està traccionant, l'altre s'està comprimint; conseqüentment s'haurà d'analitzar el circuit elèctric pertinent en funció dels requeriments finals.
- Mode elèctrodes integrats: En aquest cas es busca un dispositiu de vibració alternativa, que tenint en compte els coeficients piezoelèctrics, pugui arribar a generar una potència de sortida superior. S'accentua en casos on les toleràncies del material condueixin a moviments relatius entre materials.
- Mode inèrcia: Els objectius d'introduir una massa a l'extrem lliure són els següents: perquè és un mètode que permet emmagatzemar energia mecànica en casos on es busqui repartir l'energia de forma prolongada en un interval de temps més llarg, i també per poder fixar una freqüència desitjada (normalment la natural del transductor o de la barra) i així

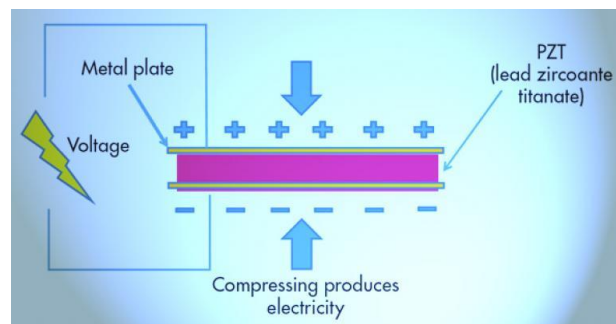
minimitzar la deflexió interna del material, que significa una pèrdua d'energia innecessària.

A continuació es mostren els diferents modes explicats ordenats respectivament d'esquerra dreta i de dalt a baix:



Il·lustració 15: Modes de flexió d'una biga en voladís. Font: [17]

- ❖ Mode 33: Es tracta d'un dels més coneguts dins el món de la piezoelectricitat, i encara que s'ha intentat el seu estudi per la recollida energètica, actualment té més sortides al mercat com a sensor o altres aplicacions. El seu mètode de funcionament és el més senzill, com a conseqüència de la seva deformació de tracció-compensió al aplicar una força en sentit perpendicular (aixafament). La diferència de potencial creada serà directament proporcional a la distància modificada respecte l'estat inicial.

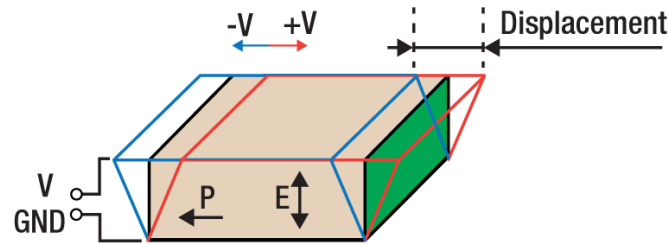


Il·lustració 16: Mode d'operació 33 (compressió). Font: [18]

- ❖ Mode 15: Aquest mode d'operació és denominat per a tots els piezoelèctrics sotmesos a una tensió "de tall" o de cisalla i són els menys usats dels tres modes comentats.

La direcció de la sortida elèctrica és perpendicular a la direcció de l'estrès aplicat i de polarització, fet que provoca l'obligació d'utilitzar dos conjunts d'elèctrodes independents per cada cas.





Il·lustració 17: Mode d'operació 15 (cisalla). Font: [19]

### 5.3. Energy Harvesting

El concepte d'“Energy Harvesting” defineix un procés per el qual es genera energia elèctrica a partir de l'energia residual present a l'ambient.

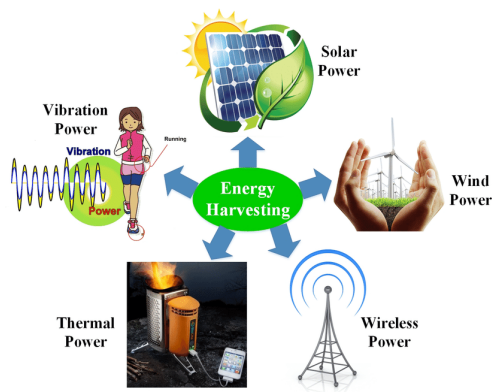
A les darrers dècades ens hem anat acostant a sistemes d'energia que no consumeixen combustibles fòssils per tal d'evitar un excés de pol·lució a les grans ciutats i conservació del medi ambient. Això ha estat possible gràcies a la inversió econòmica per a la recerca de noves tecnologies i exploració de fonts d'energia naturals com són la solar, eòlica, hidràulica, biomassa o geotèrmica. Tot i que encara ens resulten imprescindibles les energies produïdes a partir del carbó, petroli, urani i gas, la societat recolza cada vegada més les alternatives netes i abraça la idea de protegir el planeta del canvi climàtic i l'escalfament global.

Mentre aquests dos tipus d'energia conviuen per afrontar la major part de la demanda mundial d'energia, els sistemes d'Energy Harvesting tenen com a propòsit alimentar petits equips electrònics i dispositius elèctrics amb baixes potències i consums. Aquesta tecnologia permet el funcionament d'aparells sense necessitat d'estar connectats a la xarxa, dotant-los d'autonomia i la reducció de les substitucions de bateries contaminants. També possibilita l'alimentació de sistemes de difícil accés reduint considerablement costos d'instal·lació en zones aïllades.

El procés s'alimenta de l'energia que roman a l'ambient com pot ser llum, vibracions del terreny, moviments de les onades, gradients de temperatura, piezoelèctrics, piroelèctrics o inducció magnètica; i aquesta es pot transformar a l'instant en electricitat o emmagatzemar-la.

Per emmagatzemar-la hi ha 3 opcions: bateria, condensador o supercondensador. El primer dels casos es fa servir quan s'ha de proporcionar un flux d'energia constant, i els supercondensadors quan es busca un funcionament dels dispositius sense manteniment, ja que permeten cicles de càrrega i descàrrega il·limitats.(14)



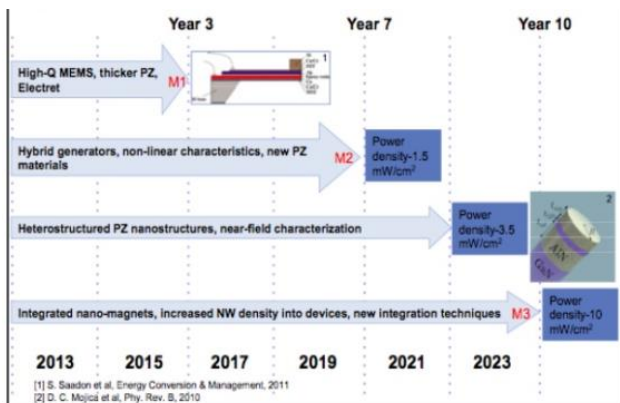


Il·lustració 19: Sistemes Energy Harvesting. Font: [21]

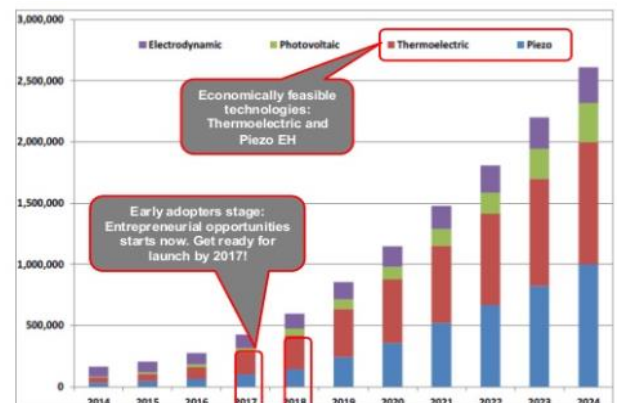


Il·lustració 18: Emmagatzematge d'energia en Energy Harvesting. Font: [20]

Avui en dia ja hi ha grans empreses enfocades a l'estudi de nous tipus de recollida d'energia com el soroll, nanogeneradors, aerogeneradors basats en ressonància aerostàtica o polímers electroactius. Les previsions de futur són d'un elevat creixement mundial, sobretot pels piezoelèctrics, tema en el qual se centra en aquest projecte.(15)



Gràfica 4: Estimació de l'evolució de la densitat de potència dels piezoelèctrics fins el 2023. Font: [23]



Gràfica 5: Predicció mercat global dels energy harvester en milers de \$ fins l'any 2024. Font: [22]

Segons aquestes estimacions, els sistemes d'Energy Harvesting més utilitzats en un futur proper, són els piezoelèctrics i termoelectrics. Aquest increment de vendes en el mercat està relacionat amb el fet que s'espera que la densitat de potència dels piezoelèctrics pugui arribar fins als 10 mW/cm² l'any 2023.(16)

## 5.4. Sistema mecànic del prototip real

### 5.4.1. Diferències respecte el prototip anterior

Es té com a referència un prototip petit i fet majoritàriament de fusta, i es passa a un aparell sòlid, més complet i amb una rampa per poder accionar el mecanisme:



Il·lustració 21: Prototip implementat a GMF.  
Font pròpia



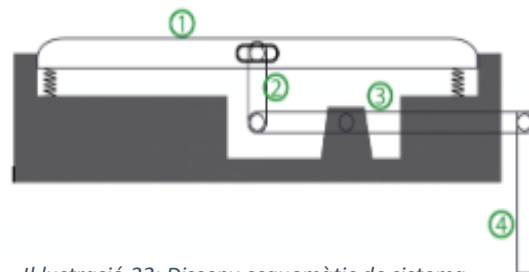
Il·lustració 20: Mecanisme global implementat. Font pròpia

#### 5.4.1.1. Sistema captació d'energia

Amb l'objectiu de remarcar les diferències entre el present prototip i l'últim optimitzat, es projecten els dos sistemes de captació i s'argumenta el perquè dels canvis:



Il·lustració 23: Disseny real de sistema captació d'energia del prototip inicial. Font [6]



Il·lustració 22: Disseny esquemàtic de sistema captació d'energia del prototip inicial. Font [6]

El sistema que rep la força externa, inicia aquest procés de transformació del mecanisme cap a un aparell més robust i disposat a assolir impulsos d'ordre de magnitud més grans.

Abans, aquest sistema constava d'una plataforma feta de fullola amb unes dimensions aproximades de 40x40 cm, a la part inferior, entre la plataforma i el braç de palanca, hi havia una barra transmissora de moviment que regulava la posició vertical del extrem del braç de potència.

L'últim element, la cremallera, estava acoblada a l'altre punta de la palanca amb un cargol. A vegades, degut a l'arc de circumferència descrit per la palanca al girar, causava la fallada general pel bloqueig de l'engrenatge entre la pròpia cremallera i el pinyó.(13)



*Il·lustració 24: Biga d'accionament amb rampa.  
Font pròpia*



*Il·lustració 25: Biga desmuntada amb detall de la palanca.  
Font pròpia*

Visualment ja es pot apreciar la dissemblança en elements com la plataforma, que ara és una biga de 2 metres de llargada, s'ha eliminat la barra transmissora per un topall que comporta menys pèrdues de fregament, i una cremallera que forma part del braç de la palanca i que en tot moment engrana amb el pinyó.

Tots els components actualment són metàl·lics, fet que ajuda a tenir un conjunt més resistent, que no es trenqui ni es pugui doblegar, i que fixi més eficientment, restringint moviments solidaris que no afavoreixen la transmissió del moviment.

#### *5.4.1.2. Sistema de transmissió*

Si bé el muntatge de la transmissió es basa en els mateixos principis en ambdós prototips, les modificacions que hi ha hagut en el nou disseny, tenen com a objectiu simplificar els òrgans de propagació del moviment.





Il·lustració 27: Sistema de transmissió de l'antic prototip. Font [6]



Il·lustració 26: Sistema transmissió actual. Font pròpia

Comparant les dues il·lustracions de sobre, es poden copsar les contrarietats més significatives i les semblances. La principal desigualtat és el numero d'eixos que té cadascun, i el total d'engranatges: l'antic consta de 3 eixos amb 5 engranatges de diferent diàmetre que defineixen un sistema multiplicador, mentre que el nou està equipat amb un sol eix que abasteix tots els elements necessaris.

El present dispositiu aprofita elements quotidians com els pinyons i la roda d'una bicicleta i s'adapten a les condicions de treball, d'aquesta manera es té la possibilitat de variar els paràmetres de gir (velocitats i acceleracions angulars) amb un simple canvi de pinyó. La roda comentada que fa de volant de inèrcia està allotjada en el mateix eix, i permet afegir més massa per influir en la inèrcia total del sistema; contràriament, l'anterior dispositiu està format per un volant de inèrcia invariable i que està col·locat fora de la petita bancada.

El següent punt tracta sobre les lleves: d'una banda hi ha la lleva actual de metall i amb 8 dents, i per l'altre tenim dues lleves de fusta amb una sola cresta i amb irregularitats pel seu contorn. Si aquestes no estan perfectament sincronitzades, poden aparèixer dificultats alhora de recollir l'energia amb el sistema elèctric.

Finalment i relacionat amb el segon punt, es comenta la introducció d'un embragatge independent en el TFG del Pol Gassol (últim realitzat), tanmateix, en l'actual estudi es beneficia de l'engranatge d'una bicicleta real, el qual ja porta incorporat el mecanisme.

En poques paraules, el sistema modern és més flexible, segur, capaç de suportar forces majors i més simplificat; tot això comporta una major eficiència.

#### 5.4.1.3 Sistema generador d'energia

Per acabar aquest bloc de diferències, s'exposa la part amb la qual aquest treball pren sentit: els materials piezoelèctrics generadors d'electricitat. Malgrat que els dos projectes tenen la mateixa idea de flectar els transductors, hi ha certs canvis que mereixen ser argumentats. S'il·lustren doncs, els dos sistemes:



Il·lustració 28: Anterior sistema generador d'energia.  
Font [6]



Il·lustració 29: Generador del nou prototip. Font pròpia

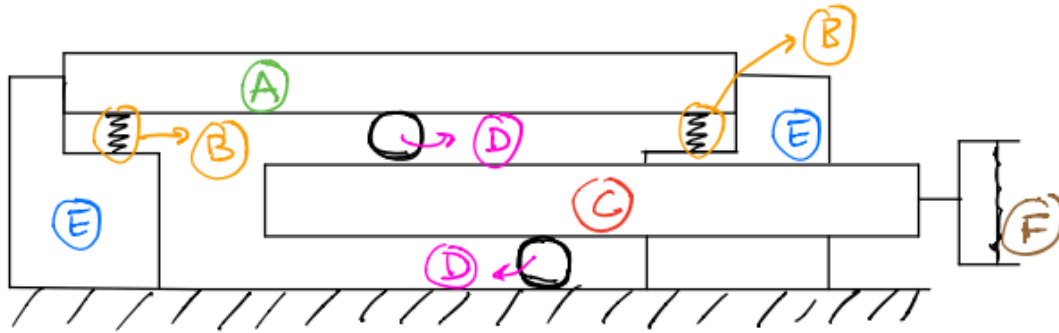
La disposició de les platines en ambos casos és el mateix, i tant les platines com els transductors piezoelèctrics, també. Però els canvis que ha sofert la caixa, poden arribar a marcar les diferències.

Les dimensions de la bancada són majors i està feta de metall, això dóna lloc a l'augment del numero de platines que es poden fer enquibir (un total de 10) en el nou model. Ara bé, en l'anterior sistema, s'hi troba dues ànimes que funcionen independentment una de l'altre i que conformen dos generadors elèctrics, recollint un global de 4 platines.

Les conseqüències d'aquestes modificacions, s'espera que duguin a valors d'energia més elevats en el pas d'un vehicle.

#### 5.4.2. Sistema captador d'energia

L'esquema inicial d'aquest element és el següent:

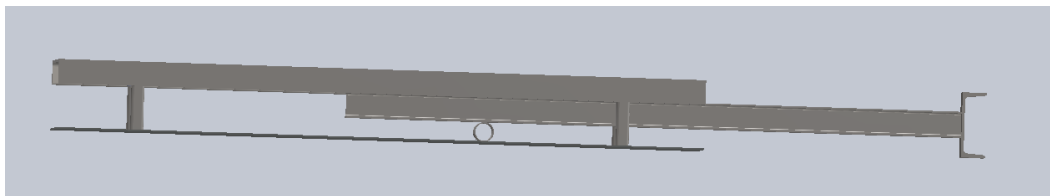


Il·lustració 30: Elements que formen part del sistema mecànic. Font pròpia

Com bé es pot apreciar a la imatge, és un conjunt força senzill que consta de:

- La biga o plataforma (A)
- 4 molles (B)
- Una barra de transmissió o palanca (C)
- 2 pivots cilíndrics (D)
- La bancada (E)
- Una cremallera o cadena (F)

L'esquema inicial d'aquest sistema representat en *SolidWorks*, és el següent:



Il·lustració 31: Disseny del sistema de captació d'energia. Font pròpia

El procés comença quan el vehicle contacta amb la plataforma (que per l'acció de les molles en la seva posició de repòs, sobresurt uns centímetres respecte la bancada), i gràcies al seu pes, venç les forces resistents de les molles. La clau del mecanisme recau en el fet que s'impedeix el moviment horitzontal de la biga induït per la velocitat del cotxe, reduint així les pèrdues d'energia que no afavoreixen la transmissió a l'engranatge.

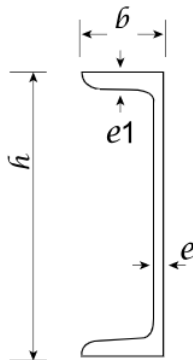
Al baixar la biga, es transmet la força resultant a la següent part: la barra, que també tendeix a desplaçar-se cap a baix, activant doncs la palanca a través d'un pivot en forma de circumferència. D'aquesta manera s'aconsegueix transmetre l'impuls a l'altre extrem de la barra (que per forces de reacció puja) que està soldat a un cremallera obligada a seguir el moviment radial creat per la palanca.

Per tant doncs, el conjunt té la funció de convertir i transmetre la força vertical creada pel vehicle, en un moviment radial de la cremallera que farà possible el gir del proper sistema i permet que retorni a la seva posició inicial en quan la força desapareix.

#### 5.4.2.1. Plataforma / Biga

És evident que la biga és la única part que està amb contacte amb el cotxe i l'element que rep la força externa. A través d'ella es comprimeixen les molles i s'acciona tot el mecanisme. Ha de ser un cos consistent i resistent al desgast, ja que patirà un elevat numero de cicles, amb forces horitzontals (si el cotxe hi accelera o frena sobre) i verticals (moviment esperat gràcies a les molles i el pes), i a la vegada serà la part més exposada a l'ambient (varietat de temperatures i possibles reaccions químiques).

Per tal que treballi bé, és imprescindible que estigui ben fixada amb la bancada i no pugui girar envers cap punt, perquè sinó començarien a aparèixer més forces de fregament, i en el pitjor del cassos podria arribar a encallar-se provocant dificultats de conducció a la via.



Il·lustració 32: Perfil biga UPN. Font: [24]

	DIMENSIONES	TERMINOS DE SECCIÓN	REFERIDO AL EJE X-X	REFERIDO AL EJE Y-Y	
PERFILS	h	b	e	e1=r	PESO
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
UPN-80	80	45	6,0	8,0	8,87
UPN-100	100	50	6,0	8,5	10,87
UPN-120	120	55	7,0	9,0	13,74
UPN-140	140	60	7,0	10,0	16,40
UPN-160	160	65	7,5	10,5	19,27
UPN-180	180	70	8,0	11,0	22,55
UPN-200	200	75	8,5	11,5	25,93

Il·lustració 33: Paràmetres característics biga UPN 200 (última de totes). Font: [24]

Se sap que els treballadors de GMF han format aquesta plataforma amb una biga UPN 200 de 2 metres de llargada, i com que els paràmetres d'aquest perfils estan preestablerts, podrem calcular el pes fàcilment.

#### 5.4.2.2. Molles plataforma

La funció de les molles del prototip és imprescindible per tal que tots els elements acoblats entre si tornin a la seva posició inicial en un mínim de temps possible.

L'aparell conté un total de 5 molles, però les podem classificar en dos tipus:

- Molles plataforma
- Molla ànima

A la plataforma com ja hem comentat anteriorment, hi ha 4 molles (distribuïdes 2 a un extrem i 2 a l'altre), totes elles iguals (amb les mateixes prestacions) per tal que satisfacin l'equilibri mecànic i la plataforma torni a estar preparada per a un nou cicle.

El paràmetre que s'ha de calcular abans de comprar-les, és la constant d'elasticitat de la molla "K". En aquest cas hem de tenir en compte que entre les 4 molles, s'ha de produir una força més gran que la produïda pel pes de la biga, perquè en cas contrari, no seria possible restituir-la a la posició de repòs.



*Il·lustració 34: Possible conjunt de 4 molles per subjectar la plataforma. Font: [25]*

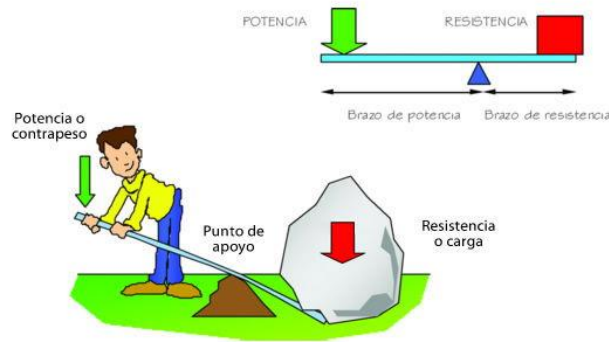
#### 5.4.2.3. Palanca amb cremallera

La palanca no deixar de ser una altra barra equivalent a la plataforma, però la seva funció és completament diferent; el que es busca amb aquest element és aprofitar la força del pes que rep la biga perquè empenyi el braç de potència, i transmetre-la fins a l'extrem contrari (braç de resistència). Això s'aconsegueix gràcies a uns topalls o pivots circulars que actuen com a punts de suport i permeten el balanceig sobre si mateix de la barra. La forma circular i la baixa rugositat (alumini polit i llis) eliminen forces de fregament que podríem tenir si utilitzéssim altres estratègies.

A l'extrem dret hi tenim enganxada una estructura amb la cremallera tensada que es mou solidàriament amb la barra i que engrana amb un pinyó (connexió entre sistema de captació i sistema de transmissió).

És un dels components que més s'ha d'estudiar durant el projecte, doncs la variació de les distàncies entre topalls i per la regla de la palanca, es pot arribar a optimitzar la transmissió de forces i regular velocitats i distàncies per tal que el conjunt treballi a la perfecció.(17)





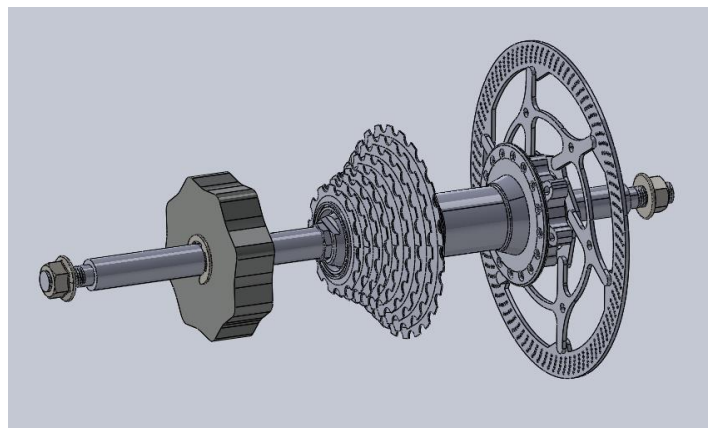
Il·lustració 35: Efecte palanca. Font: [26]

#### 5.4.3. Sistema de transmissió

És l'etapa intermèdia, composta de 6 elements que giren a una mateixa velocitat angular amb un disseny que ocupi el mínim volum possible:

- Eix
- Engranatge
- Lleva
- Volant d'inèrcia
- Coixinets
- Xavetes

Tot seguit es mostra un esquema del apartat a estudiar i que s'ha dibuixat amb *SolidWorks*:



Il·lustració 36: Estructura del sistema de transmissió. Font pròpia

Respecte els treballs anteriors, aquesta és la part que més s'ha variat. S'ha apostat per eliminar la multiplicadora de velocitat que implicava molt fregament degut a la gran quantitat d'engrenatges en contacte entre si i un augment del volum, que a l'hora de la implementació a la via, podria ser un aspecte molt desfavorable. Ha estat substituït en

aquest cas per un sol eix capaç de reproduir les mateixes funcions però amb més efectivitat i flexibilitat de canvis.

L'eix unit amb les xavetes, és la part que fixa els altres components i fa que tots es comportin com un sol sòlid; està suspès per dos coixinets situats a cada extrem i encaixats a una bancada en forma de forquilla, que possibiliten el moviment relatiu sense fregament.

El moviment d'aquest sistema s'inicia quan el braç de resistència de la palanca puja i el contacte entre la cremallera i el pinyó accionen el gir; depenent de l'acceleració amb la qual s'impulsa aquest engranatge, la velocitat angular de tot el sistema es veurà afectada.

La part més influent és la lleva, que és l'encarregada de transformar el moviment rotatori amb un de lineal a partir de l'ànima amb la que es troba en contacte. Les seves dents delimiten la freqüència d'oscil·lació dels piezoelèctrics, al prémer l'ànima en cada passada. És la peça resistiva del sistema ja que pateix un moment en sentit contrari al de gir.

#### *5.4.3.1. Engranatge o pinyó*

El prototip està dotat d'un engranatge de bicicleta format per 9 pinyons de diferent diàmetre, que poden ser acoblats fàcilment (apropant o allunyant l'eix central) a la cremallera en funció de la relació de forces i la velocitat angular que es vulgui. El radi del pinyó i la velocitat angular són inversament proporcionals.

L'engranatge té una doble funcionalitat perquè no només capta el moviment de la cremallera quan aquesta s'accelera, sinó que també intervé com a embragatge a través d'un pinyó lliure.

Igual com a les bicicletes convencionals, aquest tipus de pinyó permet el gir de l'eix lliurement en un sentit, i engrana en el contrari. D'aquesta manera podem determinar el sentit de gir que volem que s'activi quan passa el cotxe, i en el moment de retorn, impedir que ens origini un moment resistiu.(18),(19)

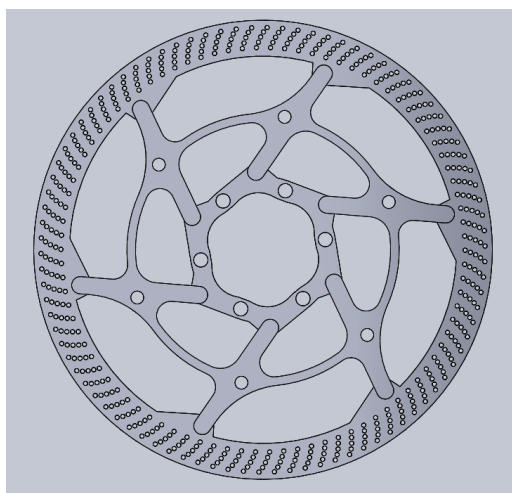
El radi dels 9 pinyons, vénen definits per la següent taula:

Taula 1: Identificació de cada pinyó amb el seu radi. Font pròpia

ENGRANATGE	
Pinyó	Radi (cm)
Pinyó 1	5,07
Pinyó 2	4,66
Pinyó 3	4,26
Pinyó 4	3,86
Pinyó 5	3,46
Pinyó 6	3,25
Pinyó 7	3,05
Pinyó 8	2,85
Pinyó 9	2,65

#### 5.4.3.2. Volant d'inèrcia

És un element passiu que s'utilitza per emmagatzemar energia cinètica i dota al sistema d'una inèrcia addicional, és a dir, quan el parell motor a l'engranatge cessa, és el propi volant el que amb la seva inèrcia, fa que el conjunt continuï girant. Per tant, el que aconseguim amb el volant d'inèrcia és poder reduir velocitats angulars (i per conseqüència, pèrdues per fregament) i prolongar el temps de gir, augmentant així l'energia final recol·lectada. A l'artefacte en qüestió, es fa servir una roda de bicicleta com a volant d'inèrcia, sabent que és un element que es pot modificar còmodament afegint-hi més massa o simplement canviant-lo per un altre.(20),(21)



Il·lustració 38: Volant d'inèrcia del prototip. Font pròpia



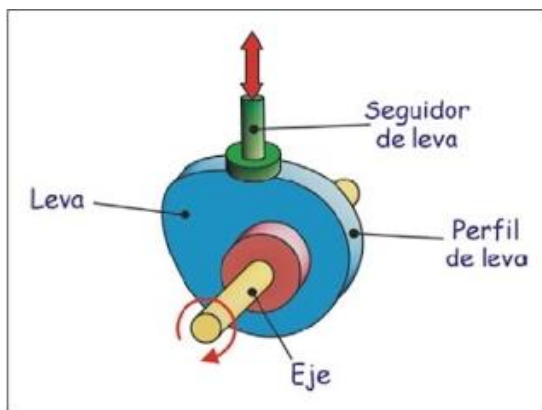
Il·lustració 37: Volant d'inèrcia d'un motor. Font: [27]

#### 5.4.3.3. Lleva

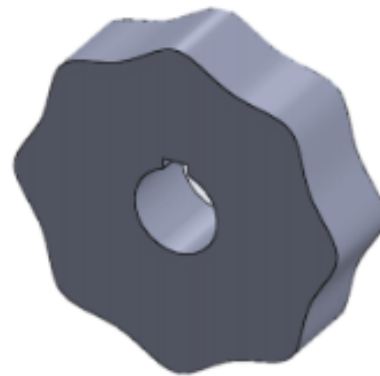
Les lleves tenen una gran varietat de perfils (de disc, cilíndriques, de translació, de tambor...) depenent de l'aplicació demanada, i en el cas que ens ocupa, es tracta d'una leva de 8 dents, separades entre si equidistantment. La seva tasca és possibilitar la conversió d'un moviment rotatiu a un de lineal alternatiu o oscil·lant (mai el contrari ja que és irreversible).

Aquestes peces estan sempre subjectes a un eix i integrades per dos parts: la fase activa, que es reflecteix quan la distància entre l'eix transmissor (l'ànima) i l'eix de rotació és variable, i la fase de repòs, quan aquesta separació és constant. Per entendre-ho millor, quan l'ànima es troba en la fase de repòs, significa que simplement està seguint el radi de la leva (traçat circular) sense patir cap alteració, en canvi quan està en l'altra fase, la leva, degut a la seva forma, empeny al seguidor i provoca el moviment.(22),(23)

És l'última part del sistema de transmissió, que a la vegada connecta amb el coixinet fixat a l'extrem de l'ànima.



Il·lustració 39: Exemple típic d'una leva. Font: [28]



Il·lustració 40: Lleva amb la qual es treballa.  
Font pròpia

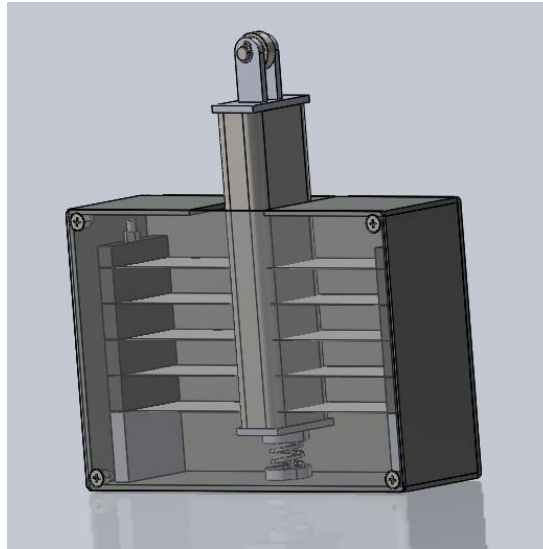
#### 5.4.4. Sistema generador d'energia

Probablement el conjunt més important de tot el prototip i el que ens ocupa el fonament teòric d'aquest treball. És l'última part de tot el conjunt mecànic, just abans d'entrar amb la part elèctrica, i està dissenyat per obligar als piezoelèctrics a flexionar-se.

El sistema està format per 6 components:

- El coixinet
- L'ànima o seguidor
- La molla
- Les 10 làmines o platines
- Els 20 transductors piezoelèctrics
- La caixa

L'esquema, dissenyat en *SolidWorks* és el següent:



*Il·lustració 41: Sistema generació energia. Font pròpia*

La caixa és un element fixat al terra que no experimenta moviment en cap moment i té diversos ressorts on es permeten encaixar la molla i un extrem de cada làmina d'alumini. L'altre flanc de les laminees va encastrat a l'ànima oscil·lant.

Tot comença quan la lleva, al rotar l'eix, empeny el seguidor cap a baix, i comprimeix la molla (que se situa a la part inferior); això causa un moviment relatiu entre el propi seguidor i la caixa, forçant les làmines a deformar-se mecànicament. Al minvar la distància entre eix i seguidor degut al perfil de la lleva, la molla capgira el sentit de desplaçament i fa que les fulloles d'alumini (platines) es flexionin en sentit invers.

Cada vegada que es consumeix un arc de lleva, deforma les làmines i conseqüentment els transductors, i es genera una diferència de potencial que, a través del circuit elèctric es transforma en energia lumínica.

#### *5.4.4.1. Ànima (amb coixinet)*

L'ànima no deixa de ser una barra rectangular modificada per permetre l'acoblament de les platines i proporcionar un bon contacte amb la lleva i la molla. No podem passar per alt el coixinet, que proporciona la connexió amb el sistema de transmissió i està disposat amb un acabat en forma de forquilla, que li permet un fer gir net. El perquè és ben senzill, sense el coixinet tindríem un contacte directe entre ambdues parts que provocaria una fricció considerable, fet que promouria les pèrdues de propietats dels materials i d'energia.

El moviment que segueix és lineal (verticalment) i oscil·latori forçat, és a dir, sempre que se subministri suficient energia per fer girar la lleva, l'amplitud d'oscil·lació de l'ànima serà constant (encara que la freqüència variï).

#### 5.4.4.2. Molla de l'ànima

Aquesta és l'única molla allotjada al sistema de generació i ha d'estar perfectament subjectada entre l'ànima i la caixa externa. Cal que les toleràncies siguin el més petites possibles per fer que l'ajust sigui òptim; això vol dir que quan el sistema global està en repòs i la lleva no empeny, la molla no ha de quedar ni comprimida ni folgada, ja que en tal cas es perdria eficiència i podria arribar a sortir-se del seu lloc a causa de les vibracions.

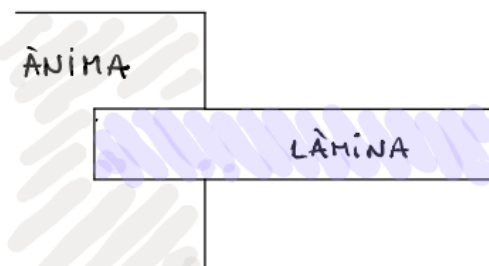
Com s'ha argumentat amb anterioritat, l'ànima segueix un impuls forçat continu per mitjà d'aquesta molla que, constantment tendeix a portar el seguidor a la posició de repòs.

#### 5.4.4.3. Làmines i transductors piezoelèctrics

Les làmines són perfils llargs i prims d'alumini als quals s'hi enganxa els transductors piezoelèctrics amb adhesiu. Aquests transductors estan instal·lats als extrems més allunyats de l'ànima (on estan fixats amb la caixa) per tal d'assolir nivells màxims d'energia, ja que és en aquesta zona on el moment flector pren un valor màxim. La col·locació dels transductors tenint en compte que n'hi ha 2 per cada platina, serà a les dues cares de la làmina, és a dir, el mètode bimorf descrit als models d'operació.

Els esforços tallants que pateixen gràcies al desplaçament d'un flanc, creen una deformació que no sempre és la desitjada. Hi ha dues possibles torsions en funció de la unió entre l'ànima i la platina:

- Si resulta que la làmina és massa gruixuda i ens trobem amb un encastament completament restringit de moviments ens trobem el següent:



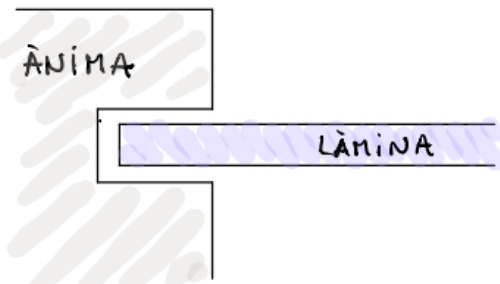
Il·lustració 42: Diagrama d'una flexió incorrecte.  
Font pròpia



Il·lustració 43: Encastament perfecte ànima – làmina.  
Font pròpia

Com es pot observar a la imatge, la làmina no segueix la corba esperada i el transductor no serà capaç de generar potència elèctrica amb eficàcia.

- Si contràriament, a la làmina se li deixa una certa tolerància i es pot moure dins el seu encaix amb certa folgança (sense permetre que arribi a sortir), tenim:



Il·lustració 44: Encaix amb folgança. Font pròpia



Il·lustració 45: Diagrama d'una flexió correcte.  
Font pròpia

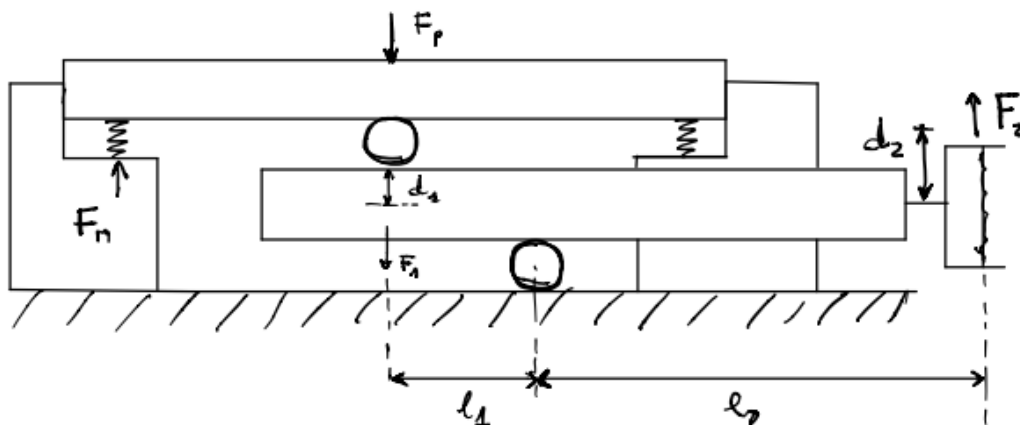
Aquí sí que podem apreciar una torsió adequada on hi ha una curvatura més o menys constant i el transductor rebrà la tensió màxima.

De cara a les anàlisis que s'estudiaran més endavant, s'haurà de tenir en compte que la llargada de la platina és de 93 mm, ja que es necessiten uns 15,7 mm per fixar-la.

#### 5.4.5. Càlculs teòrics del sistema mecànic del prototip real

A continuació es procedeix al càlcul dels paràmetres més rellevants que es necessita per preveure posteriorment (en el sistema elèctric), quins són els rangs de potència als que podrà arribar el prototip. Aquests càlculs, són els que inicialment es dissenyen pel prototip, però de cara als assajos finals, hi ha valors que es modificaran. (13)

Per començar, es dibuixa un esquema minimalista del sistema de captació amb les forces resultants i s'identifica les dades que vénen donades pel fabricant:



Il·lustració 46: Disseny de forces en el sistema de captació. Font pròpia



Són dades:

- Llargada de la biga ( $L_{biga}$ ) = 2,00 m
- Distància que es pot desplaçar verticalment la biga ( $d_1$ ) = 2,26 cm
- Diàmetre dels pivots = 6,00 cm
- Distància entre pivots ( $l_1$ ) = 0,31 m
- Distància entre pivot inferior i cremallera ( $l_2$ ) = 1,50 m

Consideracions que s'utilitzen per facilitar càlculs i eliminar incògnites que serien complicades de conèixer:

- La massa del cotxe està homogèniament distribuïda i sobre la plataforma només hi treballa la meitat del seu pes (corresponent al que suposen les dues rodes que hi circulen).
- La biga es mou totalment horitzontal sense crear frecs amb la bancada.
- El temps que la roda està sobre la biga, és el temps que tarda en comprimir les molles al 100%
- Massa del cotxe ( $m$ ) = 1000 kg.
- Velocitat d'entrada del cotxe ( $v_{vehicle}$ ) = 20 km/h.
- La cremallera i la palanca és mouen com un sol cos.

Incògnites a calcular:

- $F_P$ : força externa (de l'automòbil) que s'exerceix sobre la biga.
- $F_M$ : força resistiva provocada per una molla.
- $d_2$ : distància entre el pivot inferior de la palanca i la cremallera.
- $t$ : Temps en que la força del cotxe actua sobre la plataforma.
- Constant  $k_1$  de les molles.

Ara que sabem les dades de partida, podem començar amb els càlculs.

La força que s'exerceix a la biga gràcies al pes del cotxe és:

$$F = m \cdot a$$

$$500(kg) \cdot 9,81 \left( \frac{m}{s^2} \right) = 4905 N$$

Per trobar el temps que el vehicle roman a la plataforma, tan sols s'ha de fer una divisió entre la velocitat que porta aquest i la longitud de la biga:

$$t = \frac{L_{biga}}{v_{vehicle}}$$

$$v_{vehicle} = 20 \frac{km}{h} \cdot \frac{1000 m}{1 km} \cdot \frac{1 h}{3600 s} = 5,56 m/s$$

$$t = \frac{2 (m)}{5,56 \left( \frac{m}{s} \right)} = 0,36 s$$



Seguidament, es procedeix al càlcul de la constant de les molles de la plataforma. Per un correcte dimensionat, la suma de la força d'aquestes 4 molles ha de ser igual (o superior) a la força equivalent al pes de la biga.

Segons el promptuari, el pes d'una biga UPN 200 és de 25,93 Kg/m, si tenim 2 metres:

$$25,93 \left(\frac{kg}{m}\right) \cdot 2(m) = 51,86 \approx 52 Kg$$

La força que genera aquest pes és:

$$F_{molles} = m \cdot g$$

$$52(Kg) \cdot 9,81\left(\frac{m}{s^2}\right) = 510,12 N$$

La força que haurà de suportar cada molla serà:

$$\frac{510,12}{4} = 127,53 N$$

Per tant, la  $k$  de cada molla sabent la distància que poden recórrer, és igual a:

$$F_M = K \cdot \Delta x$$

$$K = \frac{F_M}{\Delta x}$$

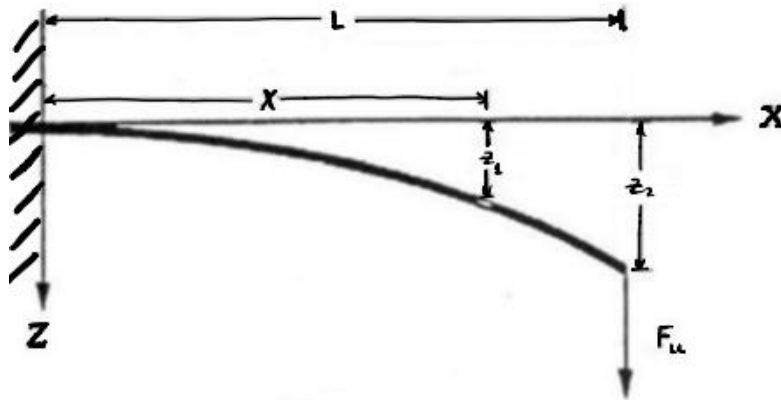
$$K_1 = \frac{127,53(N)}{0,0226(m)} = 5642,92 \frac{N}{m} \approx 5,65 kN/m$$

Després de realitzar una recerca per diferents catàlegs a internet i contactar amb diversos proveïdors, s'ha decidit adquirir la molla descrita a sota de la web *Springmakers*.

Taula 2: Molles de la plataforma a comprar. Font {1}

Fabricant	Número de l'article	Material	Constant K (KN/m)	Preu (€)
Springmakers	Compresión 2560018	EN 10270-1 SH	5,70	3,00(x4)

Tot seguit, s'inicia el procediment d'operacions del sistema de generació i es mostra una representació aproximada amb les forces que hi actuen:



Il·lustració 47: Representació del diagrama a flexió de les làmines. Font pròpia

Són dades:

- La longitud que ocupa el transductor, " $x$ " = 6,10 cm
- La longitud de la làmina " $L$ " que flecta = 7,73 cm
- Distància que pateix l'extrem de la platina, " $z_2$ " = 0,20 cm
- $E$ : mòdul d'elasticitat de l'alumini =  $7 \cdot 10^6$  N/cm<sup>2</sup>
- L'amplada de la platina " $b$ " és = 4,08 cm
- El gruix de la làmina " $h$ " és = 0,50 mm
- Numero de platines " $n_{l\grave{a}mines}$ " = 10
- Força de la molla " $F_{molla}$ " = 5 N

Hipòtesis que es duen a terme:

- L'ànima es mou completament lineal i per tant, la força només té component vertical.
- La deformació de la làmina és ideal (com la representada a la il·lustració 45).
- La platina parteix de la posició horitzontal, denominada com a posició de repòs.
- La distància màxima que pateix la platina és igual en els dos sentits, és a dir, l'amplitud es distribueix la meitat per banda respecte la posició de repòs.
- La velocitat de retorn de l'ànima és degut a la molla i la força d'elasticitat de les platines.
- Els transductors no tenen cap efecte en la flexió i no són un element d'estudi.
- Les distàncies " $z_1$ " i " $z_2$ " s'estudien en el punt de màxim desplaçament de l'ànima.
- " $z_2$ " ve donada per la distància entre el punt més extern (punt màxim de la dent) i el més intern de la lleva (punt corresponent al radi de la lleva).

Incògnites:

- $F_{LL}$ : força que produeix la lleva al empènyer l'ànima
- $F_{ànima}$ : força que rep l'ànima a través de totes les platines
- $I$ : inèrcia d'una làmina
- Distància que pateix el transductor, " $z_1$ "
- $k_2$ : constant elàstica de la molla

Per poder calcular la força necessària per a desplaçar l'ànima es fa servir la següent fórmula:

$$F_{\text{ànima}} = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot z_2}{L^3}$$

Com que no se sap la inèrcia, es formula el càlcul tenint en compte la secció rectangular i la forma amb la que treballa la platina:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$$

$$I = \frac{4,08 \text{ (cm)} \cdot 0,05^3 \text{ (cm)}}{12} = 4,25 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^4$$

Ara que no hi ha cap incògnita, només és necessari introduir els valors i s'extraurà la força requerida per desplaçar una sola làmina:

$$F_{\text{làmina}} = \frac{3 \cdot 7 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}\right) \cdot 4,25 \cdot 10^{-5} \text{ (cm}^4\text{)} \cdot 0,2 \text{ (cm)}}{7,73^3 \text{ (cm}^3\text{)}} = 0,386 \text{ N}$$

La força resultant que experimenta l'ànima és tan simple com el sumatori de totes les làmines que hi hagi incorporades:

$$F_{\text{ànima}} = F_{\text{làmina}} \cdot n_{\text{làmines}}$$

$$F_{\text{ànima}} = 0,386 \text{ (N)} \cdot 10 = 3,86 \text{ (N)}$$

A partir d'aquest càlcul es pot esbrinar el desplaçament vertical descrit per un piezoelèctric:

$$z_1 = \frac{F_{\text{ànima}} \cdot x}{6 \cdot E \cdot I} \cdot (3L - x)$$

$$z_1 = \frac{0,386 \text{ (N)} \cdot 6,1 \text{ (cm}^2\text{)}}{6 \cdot 7 \cdot 10^6 \left(\frac{\text{N}}{\text{cm}^2}\right) \cdot 4,25 \cdot 10^{-5} \text{ (cm}^4\text{)}} \cdot (3 \cdot 7,73 \text{ (cm)} - 6,1 \text{ (cm)}) = 0,138 \text{ cm}$$

Per arribar a conèixer la força que ha de vèncer la lleva, es té en compte la  $F_{\text{ànima}}$  i la força de la molla:

$$F_{LL} = F_{\text{ànima}} + F_{\text{molla}}$$

$$F_{LL} = 3,86 \text{ (N)} + 5 \text{ (N)} = 8,86 \text{ N}$$

Finalment, és necessari informar al comprador, el valor de la constant elàstica de la molla que s'allotja a la part inferior de l'ànima:

$$F_M = k \cdot \Delta x$$

$$k = \frac{F_M}{\Delta x}$$

$$k_2 = \frac{5(N)}{0,002(m)} = 2500 \frac{N}{m} = 2,5 \text{ kN/m}$$

Després de realitzar una recerca per diferents catàlegs a internet i contactar amb diversos proveïdors, s'ha decidit adquirir la molla descrita a sota de la web *Springmakers*. En el millor dels casos, tenint en compte que l'anterior prototip estava equipat amb una molla d'iguals característiques, es reutilitzarà l'antiga si està en condicions.

Taula 3: Molla ànima a comprar. Font {2}

Fabricant	Número de l'article	Material	Constant K (KN/m)	Preu (€)
Springmakers	Compresión 1384	EN 10270-1 SM	2,54	3,87

Pel que fa al sistema de transmissió, s'ha d'executar de tal manera que, els resultats obtinguts de les anteriors parts concordin i es puguin arribar a freqüències d'oscil·lació natural de les platines al variar les velocitats d'entrada del vehicle.

Són dades:

- Tots els resultats recollits anteriorment
- Densitat del material de les platines (alumini) " $\rho$ "= 2698,4 kg/m<sup>3</sup>
- Factor que depèn de la modalitat de la vibració (en el nostre cas, la fonamental) " $k_i$ " = 1,875
- Numero de dents de la lleva " $n_{dents}$ "= 8

Com a suposicions, només és té en compte que l'acceleració lineal que rep la cremallera, ve determinada per la distància que recorre ( $d_2$ ) durant el temps que l'automòbil es troba sobre la plataforma ( $t$ ). També que quan l'engranatge embraga, no hi ha fregaments que indueixin a pèrdues de velocitat angular.

Les incògnites a esbrinar són:

- La freqüència natural de les platines, i per tant, de l'ànima ( $f_n$ )
- Distància recorreguda per la cremallera verticalment ( $d_2$ )
- Àrea de la secció transversal de la platina (S)
- Freqüència de la lleva ( $f_{LL}$ )
- Velocitat angular de la lleva ( $w_{LL}$ )
- Acceleració angular de la lleva, i de tot el sistema de transmissió ( $\alpha_{LL}$ )
- Acceleració lineal de la cremallera ( $a$ )
- Radi pinyó per assegurar la  $f_n$  ( $r_{pinyó}$ )

A fi d'arribar a trobar el radi adequat que permeti l'oscil·lació fonamental de les làmines, es planteja un procés invers que servirà de base pels càlculs posteriors.

En primer lloc es presenta la fórmula per arribar a la freqüència desitjada:

$$f_n = \sqrt{\frac{E \cdot I}{\rho \cdot S} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{k_i}{L}\right)^2}$$

$$f_n = \sqrt{\frac{7 \cdot 10^{10} (Pa) \cdot 4,25 \cdot 10^{-13} (m^4)}{2698,4 \left(\frac{kg}{m^3}\right) \cdot 2,04 \cdot 10^{-5} (m^2)} \cdot \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\frac{1,875}{7,73 \cdot 10^2 (m)}\right)^2} = 68,84 \text{ Hz}$$

Per consegüent, la freqüència de la lleva (sabent que té 8 dents), és:

$$f_{LL} = \frac{f_n}{n_{dents}}$$

$$f_{LL} = \frac{68,84 (Hz)}{8} = 8,61 \text{ Hz}$$

A partir d'aquí, ja es pot saber la velocitat i l'acceleració angulars a la qual girarà la lleva i tot el sistema de transmissió:

$$\omega_{LL} = 2\pi \cdot f_{LL}$$

$$\omega_{LL} = 2\pi \cdot 8,61 (Hz) = 54,07 \text{ rad/s}$$

$$\alpha_{LL} = \frac{\omega_{LL}}{t}$$

$$\alpha_{LL} = \frac{54,07 (rad/s)}{0,36(s)} = 150,31 \text{ rad/s}^2$$

Una vegada arribats a aquest punt, i abans de poder calcular l'acceleració lineal de la cremallera, s'ha de fer el càlcul de  $d_2$  a través de la llei de la palanca:

$$l_1 \cdot d_2 = l_2 \cdot d_1$$

$$d_2 = \frac{l_2 \cdot d_1}{l_1}$$

$$d_2 = \frac{1,5(m) \cdot 0,0226(m)}{0,31(m)} = 0,109 \text{ m}$$

$$d = d_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

$$d = \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2 \rightarrow a = \frac{2 \cdot d}{t^2}$$

$$a = \frac{2 \cdot 0,109(m)}{0,36^2(s^2)} = 1,69 \text{ m/s}^2$$

D'acord amb el resultat obtingut, i aplicant el quocient entre dos termes, s'obté el radi del pinyó convenient perquè les làmines oscil·lin a la freqüència fonamental:

$$a = \alpha_{LL} \cdot r_{pinyó}$$

$$r_{pinyó} = \frac{a}{\alpha_{LL}}$$

$$r_{pinyó} = \frac{1,69 \text{ (m/s}^2\text{)}}{150,31 \text{ (rad/s}^2\text{)}} = 0,01124 \text{ m} = 1,12 \text{ cm}$$

Atès que no hi ha cap radi tan petit a l'engranatge, es decideix agafar el més petit disponible corresponent a 2,65 cm a raó d'assolir una freqüència el més pròxima possible. A partir d'aquí, es procedeix a recalculer els termes que variaran.

Es parteix de l'acceleració lineal de la cremallera, i es va seguint el passos en l'ordre establert:

$$\alpha_{LL} = \frac{a}{r_{pinyó}}$$

$$\alpha_{LL} = \frac{1,69 \text{ (m/s}^2\text{)}}{0,0265 \text{ (m)}} = 63,78 \text{ rad/s}^2$$

Multiplicant pel temps, tenim la velocitat angular:

$$w_{LL} = \alpha_{LL} \cdot t$$

$$w_{LL} = 63,78 \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \right) \cdot 0,36 \text{ (s)} = 22,94 \text{ rad/s}$$

I la conversió a freqüència:

$$f_{LL} = \frac{w_{LL}}{2\pi}$$

$$f_{LL} = \frac{22,94 \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right)}{2\pi} = 3,65 \text{ Hz}$$

En última instància i per determinar la freqüència de l'ànima, es multiplica pel número de dents de la lleva:

$$f_n = f_{LL} \cdot n_{dents}$$

$$f_n = 3,65 \text{ (Hz)} \cdot 8 = 29,21 \text{ Hz}$$

Tots els passos seguits fins ara, serveixen com a base per l'objectiu final del càlcul del sistema mecànic: arribar a saber la força necessària d'entrada per fer vibrar les platines. Tanmateix, no es pot arribar a aquest valor sense haver calculat les inèrcies i moments del sistema de transmissió.

Tot seguit doncs, es realitza el càlcul de les inèrcies corresponent als elements amb més pes. Cal remarcar que no s'estudia ni les xavetes ni els coixinets considerant que són



negligibles, i que suposen una dificultat afegida sense alterar pràcticament el resultat final.

A causa de la forma cilíndrica de tots els components del sistema, l'expressió emprada serà la mateixa:

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$$

Abans de presentar la resolució, convé recalcar les hipòtesis dutes a terme:

- La inèrcia del volant d'inèrcia ve definida pels constructors del prototip.
- En tots els components es té en compte un diàmetre continu (sense prendre en consideració les incisions per l'encaix de les xavetes).
- Pel càlcul de la inèrcia de l'engranatge, es fa dues simplificacions: analitzant el pes total com un sol cos (compost per 9 pinyons), i utilitzant el radi del pinyó central (5è) com a mitjana dels 9.
- S'aplica el radi primari dels pinyons i la lleva.
- En els elements que no ve donada la massa, s'ha realitzat una recerca a internet per aproximar els valors a casos reals o s'ha mantingut els valors dels treballs anteriors.(24),(13)

Seguint l'equació plantejada, queda:

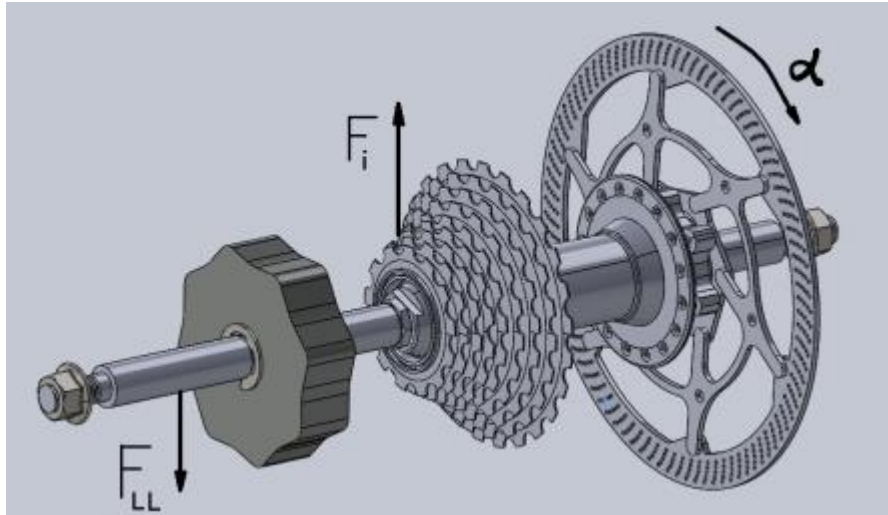
*Taula 4: Inèrcies del sistema transmissor. Font pròpia*

Component	Massa (kg)	Radi (m)	Inèrcia (kg·m <sup>2</sup> )
Eix	0,762	0,0075	2,14·10 <sup>-5</sup>
Engranatge	0,572	0,0346	3,59·10 <sup>-4</sup>
Volant inèrcia	-	-	0,2076
Lleva	0,879	0,0351	5,66·10 <sup>-4</sup>
			0,2085

D'aquesta manera, es pot afirmar que la inèrcia total és:

$$I_{total} = 0,2085 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Després d'aquest procediment, ja es pot estudiar l'equilibri dinàmic de moments creats per les forces de reacció. D'altra banda, es representa un dibuix amb els paràmetres utilitzats al càlcul:

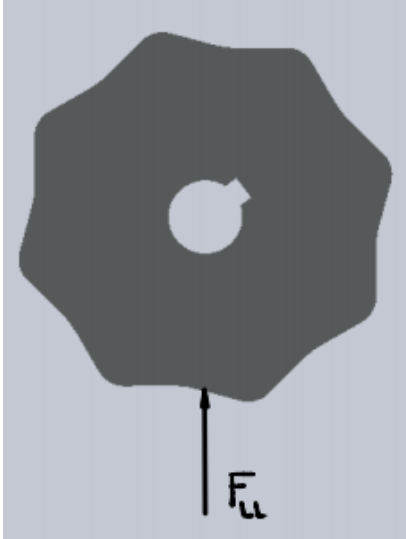


Il·lustració 48: Forces que creen moment en el sistema transmissor. Font pròpia

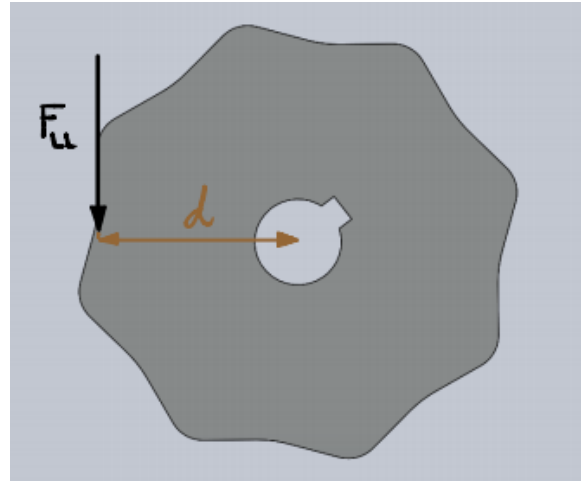
On:

- $F_i$  és la força d'impuls necessària a l'extrem del braç resistent de la palanca (a la cremallera)
- $M$  és el moment de força en un punt en concret
- $d$  és la distància que hi ha entre el punt on s'aplica la força, i el punt on es forma el moment
- $r_{LL}$  és el radi de la lleva
- Els altres termes ja han estat introduïts amb anterioritat

Aquí, com tots els casos previs, es tenen en compte moviments ideals en els quals no hi ha pèrdues per fregament. Però a més a més, convé remarcar que es té en compte el moment de la lleva com si la força no es produís en la mateixa línia. Per il·lustrar aquest fet i fer-lo intel·ligible, es mostra com funciona a la realitat i com se simplifica per poder representar un moment resistiu.



Il·lustració 49: Força resistent que no crea moment (real).  
Font pròpia



Il·lustració 50: Força generadora de moment (suposada).  
Font pròpia

A la il·lustració 49, es representa el mecanisme real, on la direcció de la força  $F_{LL}$  passa pel punt sobre el qual gira l'eix, i que per tant no hauria de crear moment dinàmic. Però a causa de les pròpies dents de la lleva, es produeix una resistència al moviment.

Per efectuar un càlcul molt més acurat, s'hauria de tenir en compte la descomposició horitzontal de la  $F_{LL}$  en cada punt del contorn lateral de la lleva i analitzar el moment que exerceix. Atès que això suposaria la realització d'un altre projecte sencer, s'opta per suposar que els impulsos actuen tangencialment com es mostra a l'altre imatge. No és menys important comentar que aquesta força se suposa que s'aplica a una distància constant ( $r_{LL}$ ), això significa que no es contempla la variació de la "d" (a la realitat, el relleu de les dents origina un distanciament respecte el centre de rotació).

Prenent en consideració l'explicació anterior, es pot procedir als càlculs:(13)

L'equilibri es basa en la igualtat següent:

$$M = I \cdot \alpha$$

Sabent que:

$$M = F \cdot d$$

Substituint a la primera expressió, queda:

$$F \cdot d = I \cdot \alpha$$

Per tal de trobar el valor final, només cal introduir els valors de referència i aïllar la força que es vol aconseguir:

$$(F_i \cdot r_{pin\acute{o}}) - (F_{LL} \cdot r_{LL}) = I_{total} \cdot \alpha_{LL}$$

El segon moment de força descrit, pren un valor negatiu perquè és de caràcter resistent i s'oposa a la rotació en el sentit desitjat.

$$F_i = \frac{(I_{total} \cdot \alpha_{LL}) + (F_{LL} \cdot r_{LL})}{r_{pin\acute{o}}}$$

$$F_i = \frac{0,2085(kg \cdot m^2) \cdot 63,78 \left(\frac{rad}{s^2}\right) + 8,86(N) \cdot 0,0351(m)}{0,0265(m)} = 513,70 N$$

Si es vol saber la força mínima necessària a l'altre extrem de la palanca, s'ha de fer la conversió amb la relació ja establerta:

$$F_{entrada} \cdot l_1 = F_i \cdot l_2$$

$$F_{entrada} = \frac{F_i \cdot l_2}{l_1}$$

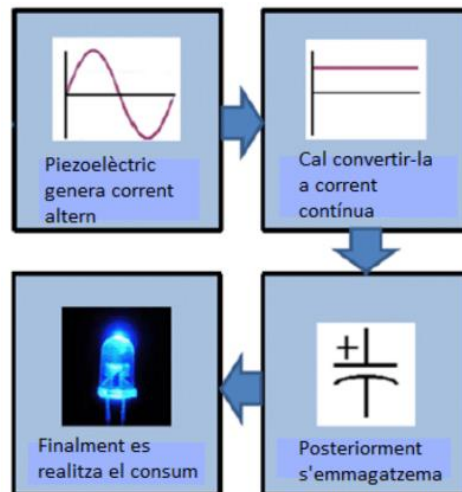
$$F_{entrada} = \frac{513,70(N) \cdot 1,5(m)}{0,31(m)} = 2485,65 N$$

Es pot afirmar que teòricament, el mecanisme funcionarà ja que la força que es requereix, és més petita de la que es disposa al passar el cotxe ( $2485,65 N < 4905 N$ ).

## 5.5. Descripció del sistema elèctric i l'emmagatzematge d'energia

El punt següent tracta del sistema elèctric, encarregat d'aprofitar el voltatge creat pels transductors i fer possible el seu emmagatzematge.

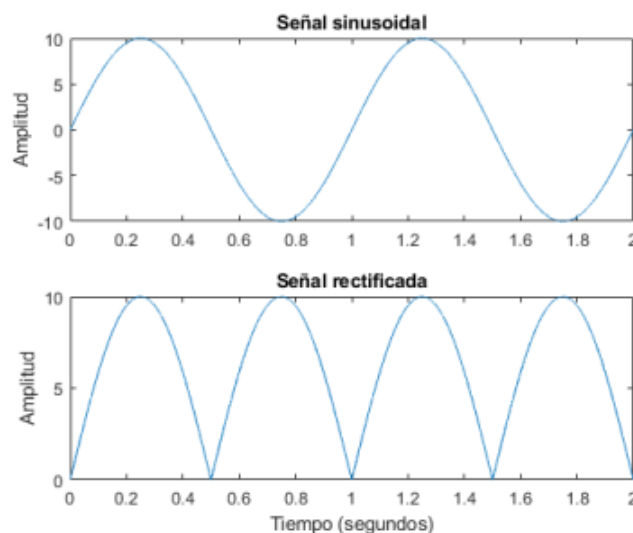
Com ja s'ha comentat amb anterioritat, els materials piezoelèctrics generen pics d'energia en funció de la freqüència mecànica a la qual són excitats. Aquest fet resulta invàlid per l'alimentació dels aparells que es pretén encendre; i és per això que serà estrictament necessari un circuit de condicionament elèctric capaç d'evadir aquests pics positius i negatius (causats per pressions intermitents quan la lleva empeny) per transformar-los en una senyal continua.



Il·lustració 51: Passos esquemàtics que segueix el circuit de condicionament. Font: [6]

Amb la il·lustració 51, es pot fer una idea dels processos a seguir abans d'arribar a acumular l'energia pel seu posterior consum, però la realitat és que d'una imatge a una altra, s'han de dur a terme altres estats intermedis que resulten complexos en alguns cassos.

El procés parteix dels transductors ceràmics, que són la font d'energia a partir de la qual es genera la ona sinusoidal. A continuació, es fa passar per un pont de díodes, on es busca aconseguir una ona rectificada com es pot apreciar a la gràfica 6:

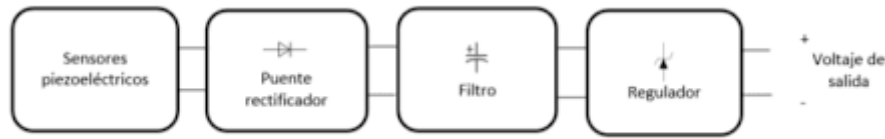


Gràfica 6: Senyal rectificada amb pont de díodes. Font: [29]

Com bé es pot veure, el pas de senyal sinusoidal a rectificada es basa en l'extracció de voltatges negatius i la seva evolució en polsos estrictament positius.

Una vegada arribat aquest punt, s'ha d'assolir un nivell d'amplitud continu; per fer-ho es requereix d'un condensador amb la capacitat de filtrar tots aquests polsos. A més a més,

és indispensable un convertidor DC-DC per tal de regular la tensió de sortida; i de tal manera que el dispositiu final (la bateria), pugui ser carregat. (25), (26)



*Il·lustració 52: Etapes del sistema elèctric. Font: [30]*

En un dels treballs predecessors, redactat pel Francisco Guillen Moya i més enfocat en el circuit de condicionament i emmagatzematge de l'energia, abans de començar a fer càlculs i rumiar possibles solucions, es va determinar iniciar un estudi mecànic sobre una platina per tal d'avaluar possibles valors de voltatge i comprovar el seu funcionament.

A continuació es fa un breu resum de l'experiment realitzat i les conclusions extretes.

L'objectiu principal de l'experiment era comparar la informació subministrada pels fabricants d'un transductor amb els valors obtinguts al laboratori, per posteriorment calcular senyals elèctrics i potències en diferents cassos.

El material emprat va ser:

- Motor elèctric
- Disc amb excèntrica
- Transductor P-876-A12
- Peça controladora de vibració (peça "c")
- Platina d'alumini
- Serjant

La metodologia és força simple: un motor que fa girar el disc amb excèntrica i a gràcies a la peça que controla la vibració es restringeix el moviment de tal manera que només hi ha una oscil·lació vertical i amb amplitud constant. La platina s'uneix a aquesta peça per un extrem, i el contrari s'encasta amb un serjant de manera que quedi fixe. Com ja s'ha argumentat durant el treball, el piezoelèctric va instal·lat a l'extrem que no es mou:





Il·lustració 53: Excèntrica i peça "c" per a una sol·licitud cíclica. Font [6]



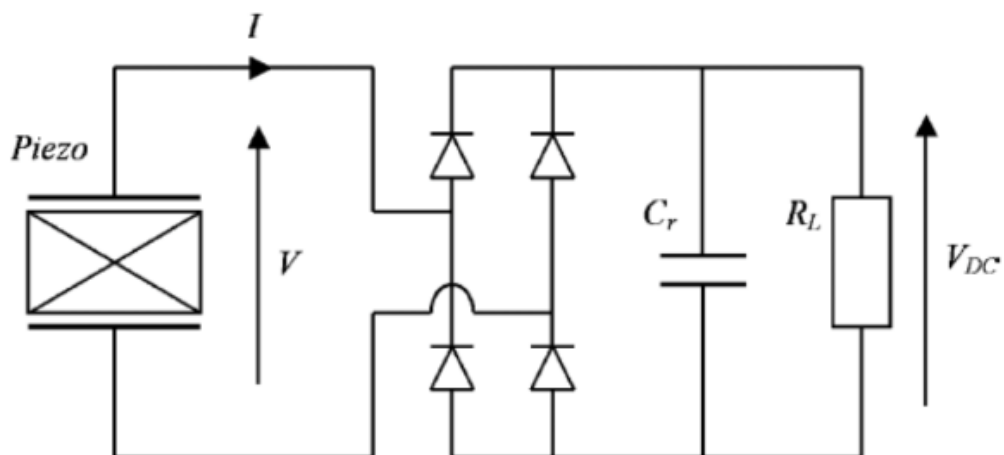
Il·lustració 54: Metodologia de l'experiment. Font [6]

Les conclusions extretes després de molts assajos, van ser que hi havia tres factors molts influents alhora de captar energia: amplitud i freqüència d'oscil·lació, i la resistència connectada. També que l'efectivitat de transformació mecànica a elèctrica, augmentava quan la longitud de les platines i la freqüència d'excitació eren majors. (27)

Un any més tard, en la redacció del seu projecte, el Pol Gassol per tal d'incidir en el tema, realitza un seguit d'experiments per tal d'observar possibles circuits que millorin els valors d'energia obtinguts fins al moment.

Es presenten 4 maquetes de circuits de condicionament dissenyats per altres empreses o individus amb l'objectiu d'optimitzar els processos d'obtenció d'energia: (28), (29), (30)

✚ Standard interface:



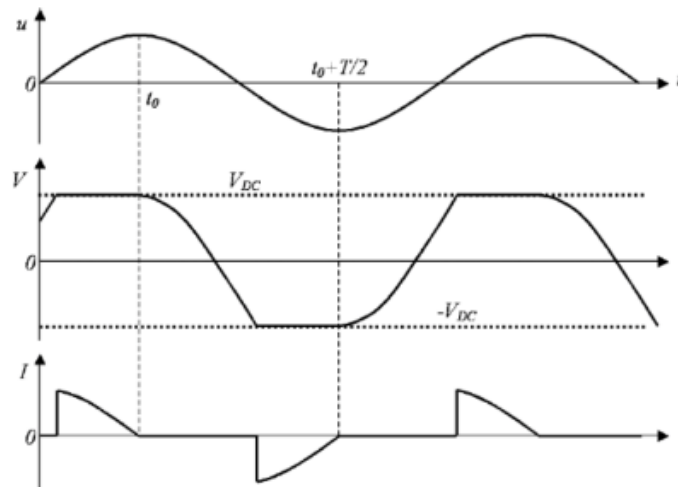
Il·lustració 55: Esquema Standard interface circuit. Font: [32]

Aquest circuit ve integrat amb un pont de díodes, un condensador ( $C_r$ ) i una càrrega resistiva ( $R_L$ ). Els dos primers són els encarregats de rectificar i eliminar

fluctuacions de tensió, i la impedància és l'equivalent a la potència consumida per la càrrega real introduïda.

El circuit en qüestió, tan sols opera en un mode de vibració estacionari, amb senyal sinusoidal. En el cas que el pont estigui bloquejat perquè el voltatge de sortida del transductor és inferior que la de l'altra banda en tensió continua, i que per tant ens trobem en circuit obert, es considerarà igualment un senyal sinusoidal.

Les formes de desplaçament, amplitud d'un punt del piezoelèctric degut a la vibració ( $u$ ), tensió ( $V$ ) i intensitat ( $I$ ) descrites respectivament són:



Gràfica 7: Ones descrites per l'Standard interface circuit. Font: [32]

Els resultats graficats són teòrics, i considerant que la tensió  $V_{dc}$  és negligible. Les formules que defineixen el circuit són les següents:

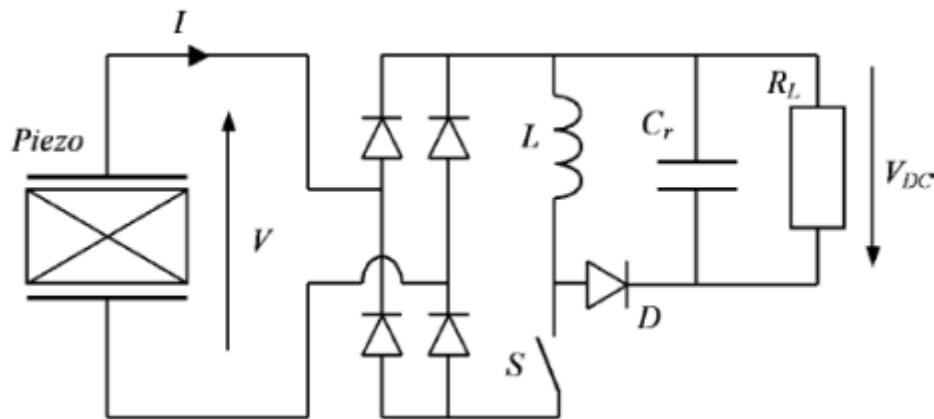
Taula 5: Fórmules Standard interface circuit. Font {3}

Paràmetre	Fórmula
Voltatge rectificat $V_{dc}$	$V_{dc} = \frac{R_L \cdot \alpha}{R_L \cdot C_0 \cdot w + \frac{\pi}{2}} \cdot w \cdot U_M$
Potència mitjana recol·lectada	$P = \frac{w \cdot \alpha^2}{(R_L \cdot C_0 \cdot w + \frac{\pi}{2})^2} \cdot w^2 \cdot U_M^2$
Potència màxima recol·lectada	$P_{max} = \frac{\alpha^2}{2\pi \cdot C_0} \cdot w^2 \cdot U_M^2$
Resistència òptima	$R_{opt} = \frac{\pi}{2 \cdot C_0 \cdot w}$
Amplitud de desplaçament	$U_M = \frac{F_M}{C \cdot w + \frac{2R_L \cdot \alpha^2}{(R_L \cdot C_0 \cdot w + \frac{\pi}{2})^2}}$

On:

- $C_0$  és el condensador de bloqueig
- $\alpha$  és el factor de força
- $w$  és la velocitat angular a la que giren els transductors
- $F_M$  és la força mecànica

✚ Synchronous charge extraction (SCE):



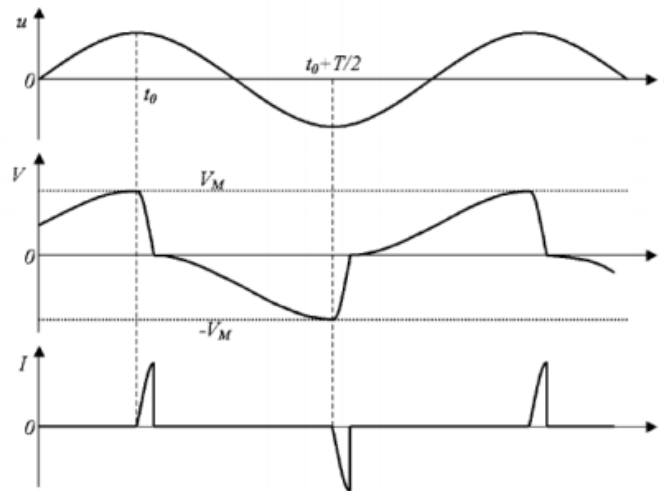
Il·lustració 56: Esquema SCE interface circuit. Font: [32]

És fàcilment apreciable que respecte l'*Standard interface circuit*, aquest posseeix a més a més, d'una bobina (L), un interruptor (S) i un díode (D). El seu propòsit és anular la càrrega elèctrica que s'acumula al condensador i traslladar-la a la càrrega final, que en aquest cas particular serà la bateria per emmagatzemar l'energia.

Les seves principals característiques són:

- Les fases d'extracció se sincronitzen amb les d'estimulació mecànica.
- Normalment el piezoelèctric es troba en configuració de circuit obert.
- Quan l'interruptor S està tancat, l'energia elèctrica acumulada al condensador, es transfereix a la bobina (extracció de la càrrega).

Les formes de desplaçament (amplitud d'un punt del piezoelèctric degut a la vibració (u), tensió (V) i intensitat (I) descrites respectivament són:



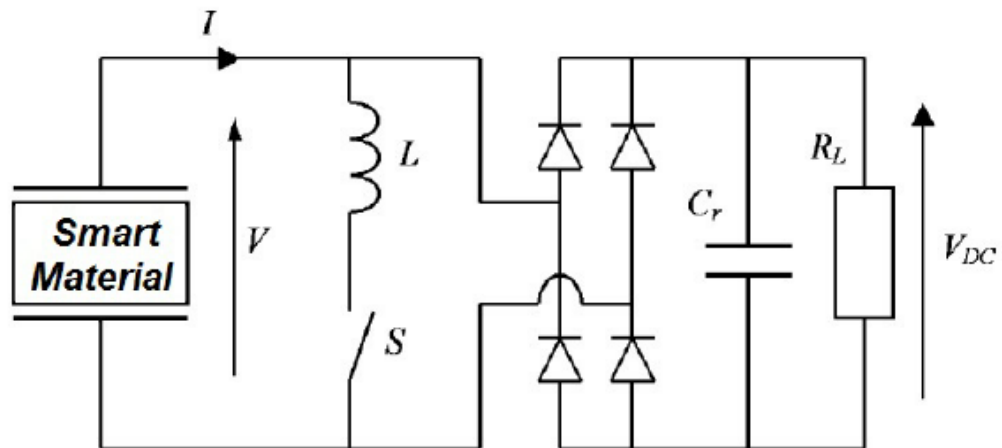
Gràfica 8: Ones descrites per l'SCE interface circuit. Font: [32]

Les formules que defineixen el circuit són les següents:

Taula 6: Fórmules SCE interface circuit. Font {3}

Paràmetre	Fórmula
Amplitud de tensió	$V_M = \frac{2 \cdot \alpha \cdot U_M}{C_0}$
Potència mitjana subministrada pel piezoelèctric	$P = \frac{w \cdot \alpha^2}{(R_L \cdot C_0 \cdot w + \frac{\pi}{2})^2} \cdot w^2 \cdot U_M^2$
Amplitud de desplaçament (funció de la força externa)	$U_M = \frac{F_M}{C \cdot w + \frac{4 \cdot \alpha^2}{C_0 \cdot \pi}}$
Potència màxima recol·lectada	$P_{max} = \frac{F_M^2}{8 \cdot C}$

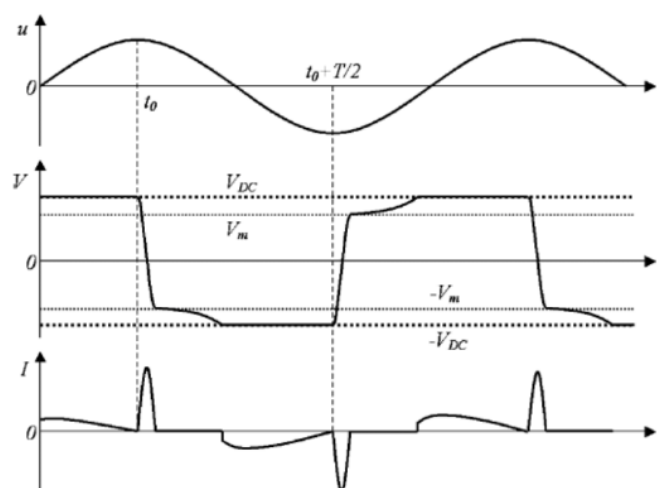
### Parallel SSHI:



Il·lustració 57: Esquema del Parallel SSHI interface circuit. Font: [32]

Les sigles provenen de l'anglès *Synchronized Switch Harvesting on the Inductor* i és un mètode no lineal de control de les vibracions. Com es pot apreciar a la il·lustració, just abans del pont rectificador s'hi troba una branca connectada en paral·lel amb el transductor piezoelèctric que consta d'una bobina i un interruptor. Aquest commutador elèctric s'engega ràpidament quan el desplaçament mecànic pren un valor màxim, i és en aquest moment quan es posa en marxa el circuit elèctric oscil·lant  $LC_0$ . Després de mig període elèctric, es desconnecta l'interruptor, provocant que la tensió es capgiri.

Les formes de desplaçament (amplitud d'un punt del piezoelèctric degut a la vibració ( $u$ ), tensió ( $V$ ) i intensitat ( $I$ ) descrites respectivament són:



Gràfica 9: Ones descrites per el Parallel SSHI interface circuit

Durant el procés d'inversió, s'indueixen unes pèrdues energètiques majoritàriament causades per l'inductor i l'interruptor, i aquestes vénen representades pel factor de qualitat elèctric  $Q_i$ .

La relació entre tensions és funció de  $Q_i$  i ve determinada per l'equació:

$$V_m = (-V_{dc}) \cdot e^{-\frac{\pi}{2Q}}$$

On:

- $V_m$  és la tensió del piezo després de la inversió
- $V_{dc}$  és la tensió del piezo rectificada
- $Q_i$  és el factor de qualitat

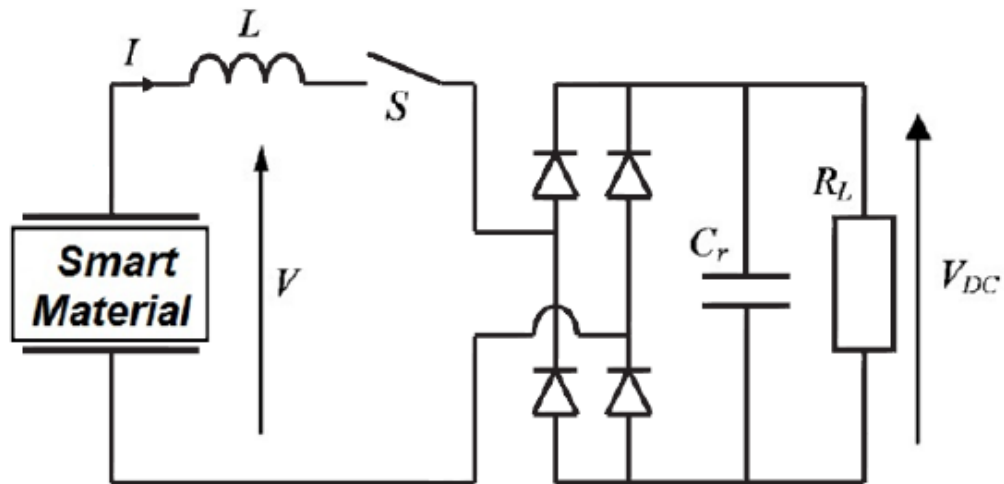
Les formules que defineixen el circuit són les següents:

Taula 7: Fórmules Parallel SSHI interface circuit. Font {3}

Paràmetre	Fórmula
Voltatge rectificat $V_{dc}$	$V_{dc} = \frac{2 \cdot R_L \cdot \alpha}{R_L \cdot C_0 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w + \pi} \cdot w \cdot U_M$
Potència mitjana recol·lectada	$P = \frac{4 \cdot R_L \cdot \alpha \cdot w^2}{(R_L \cdot C_0 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w + \pi)^2} \cdot U_M^2$
Potència màxima recol·lectada	$P_{max} = \frac{\alpha^2 \cdot w}{\pi \cdot C_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)} \cdot U_M^2$
Resistència òptima	$R_{opt} = \frac{\pi}{C_0 \cdot w \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}$
Amplitud de desplaçament	$U_M = \frac{F_M}{Cw + \frac{4R_L \cdot \alpha^2}{\pi} \cdot \frac{R_L \cdot C_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w + 2\pi}{(R_L \cdot C_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w + \pi)^2}}$



Series SSHI:

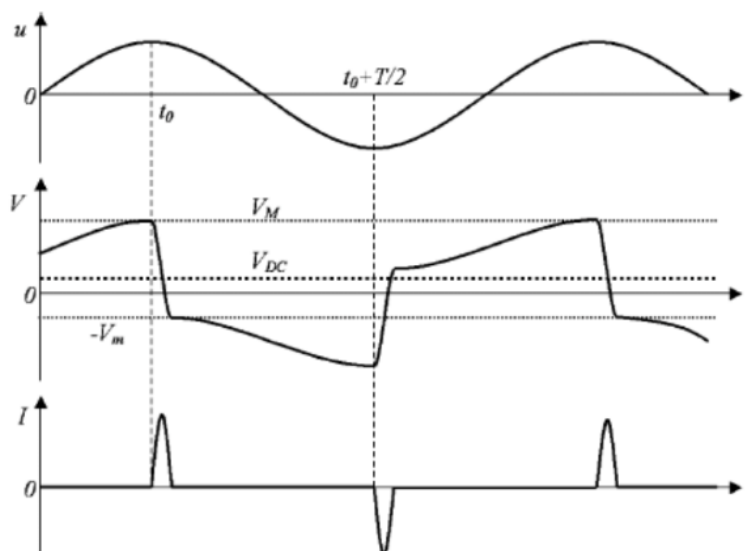


Il·lustració 58: Esquema del Series SSHI interface circuit. Font: [32]

Igual com en el cas anterior, aquí també es connecta una bobina i un interruptor seguidament, però amb la característica que són associats amb sèrie en comptes de en paral·lel.

La majoria de les vegades, l'interruptor està obert, i el seu control és idèntic que el descrit en el *Parallel SSHI*. Per aquells moments en que el commutador no estigui en la seva posició normal, el  $C_o$  de bloqueig transferirà part de la seva energia emmagatzemada al  $C_r$  passant pel pont de díodes.

Les formes de desplaçament, amplitud d'un punt del piezoelèctric degut a la vibració ( $u$ ), tensió ( $V$ ) i intensitat ( $I$ ) descrites respectivament són:



Gràfica 10: Ones descrites pel Series SSHI interface circuit. Font: [32]

La relació entre les tensions i el factor de qualitat ve representat per la següent igualtat:

$$V_m - V_{dc} = -(V_M - V_{dc}) \cdot e^{-\frac{\pi}{2Q}}$$

On  $V_M$  és la tensió del transductor abans del procés d'inversió i els altres termes ja s'han definit en l'anterior apartat (*Parallel SSHI*).

Les formules que defineixen el circuit són les següents:

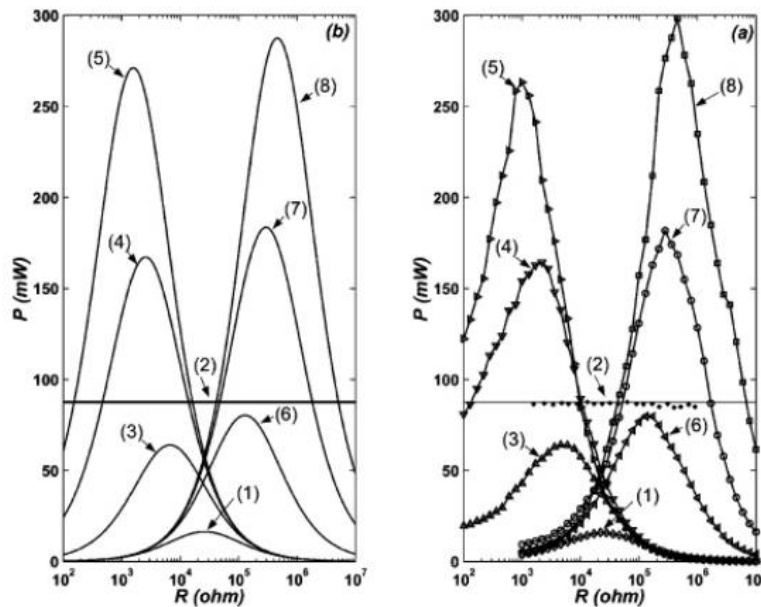
Taula 8: Fórmules del Series SSHI interface circuit. Font {3}

Paràmetre	Fórmula
Voltatge rectificat $V_{dc}$	$V_{dc} = \frac{2 \cdot R_L \cdot \alpha \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w}{2R_L \cdot C_0 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w + \pi \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)} \cdot U_M$
Potència mitjana recol·lectada	$P = \frac{V_{dc}^2}{R_L}$
Potència màxima recol·lectada	$P_{max} = \frac{\alpha^2 \cdot w \cdot U_M^2 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}{2\pi \cdot C_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}$
Resistència òptima	$R_{opt} = \frac{\pi \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}{2C_0 \cdot w \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}$

De manera paral·lela, s'estudia l'energia elèctrica generada pels sensors piezoelèctrics al ser excitats mecànicament amb una amplitud sinusoidal i freqüència constant, com és particular en assajos de recol·lecció d'energia.

Per realitzar l'experiment, s'utilitza una làmina que oscil·la 2 mm (amplitud) amb una freqüència de 56 Hz, 18 transductors col·locats en una sola biga en voladís (9 a cada cara) i situats el més a prop possible a l'extrem encastat, i connectats entre si en paral·lel.

En els resultats mostrats a la gràfica de sota, es pot apreciar la relació de potència aconseguida, en funció dels 4 circuits presentats, la resistència equivalent de càrrega i el factors de qualitat.



Gràfica 11: Potència recol·lectada a nivell teòric (a) i a nivell experimental (b) en funció de la resistència amb la configuració explicada. Font: [32]

La correspondència entre les corbes i les interfícies ve indicada per la taula 9:

Taula 9: Correspondència entre les corbes i el circuit utilitzat. Font pròpia

Corba	Interfície	Factor de qualitat
1	Standard interface	-
2	SCE interface	-
3	Series SSHI interface	5
4		8
5		13
6	Parallel SSHI interface	5
7		8
8		13

Les conclusions que es poden extreure d'aquí són varies, i confirmen en alguns cassos, els pronòstics esperats:

- Les 3 darreres tècniques desenvolupades obtenen major energia que la més bàsica, l'*Standard interface*.
- L'*SCE interface* obté valors de potència de fins a 6,5 vegades més gran que el model primari (teòricament). Factor que es manté constant inclús amb la variació de la  $R_L$ , com es confirma experimentalment.

- Tant el *Parallel SSHI* com el *Series SSHI*, poden arribar a adquirir factors de 15 o més en comparació amb l'estàndard, corroborat per ambdues gràfiques.
- Els valors de potència per aquells circuits que posseeixen una inductància, són molt variats i vénen influenciats pel factor de qualitat.
- Pels cassos del *Parallel SSHI* i el *Series SSHI*, es presenta una forta influència de la  $R_L$ , aconseguint valors màxims d'energia en el primer per resistències altes, i baixes en el segon.
- Els nivells de potència marcats són els generats pels piezoelèctrics, però en cap cas és l'energia final que arriba al sistema electrònic.

L'últim terme que s'ha de tenir en compte, és l'associació entre els pedaços piezoelèctrics per tal que el voltatge no es neutralitzi. Per sincronitzar-los, ja s'ha justificat en projectes anteriors que la millor opció és la connexió en antiparal·lel; aquesta configuració permet mantenir constant el voltatge i anar sumant les intensitats de cada malla, i es basa en la connexió en paral·lel convencional, però amb una polaritat invertida.(13),(31)

## 5.6. Resum del sistema electrònic

En aquest projecte, el sistema electrònic no és un aspecte a estudiar ja que ja ha estat investigat per diversos alumnes anteriorment i en el projecte en qüestió, els objectius bàsics són el desenvolupament i millora dels sistemes mecànic i elèctric.

No obstant això i a fi d'entendre una mica en què es basa aquest terme, s'explica de manera sintetitzada perquè s'empri i de quins elements es requereix.

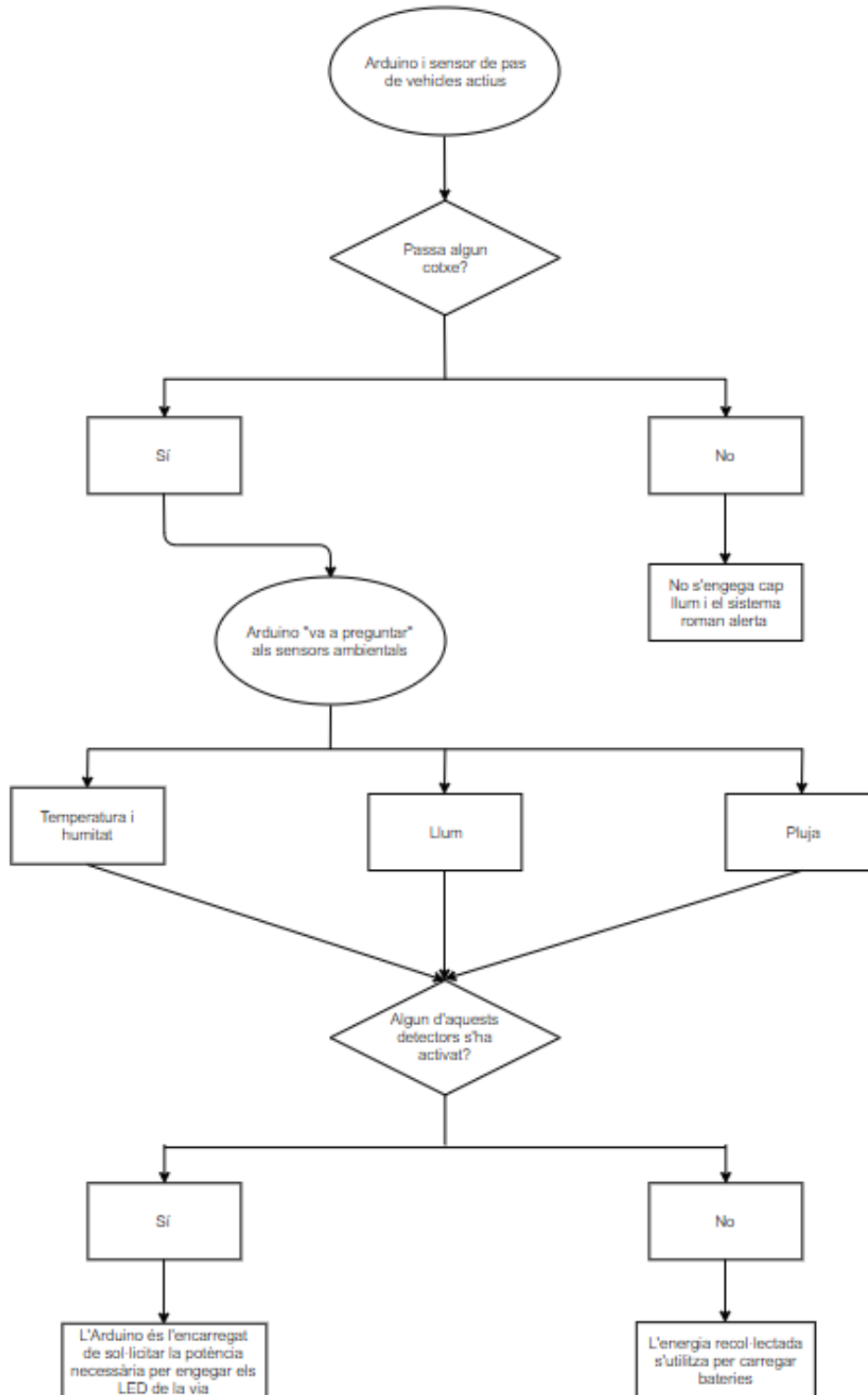
El sistema electrònic forma part de la tecnologia que es vol utilitzar per captar energia, i el seu propòsit és el de dotar al conjunt d'una "intel·ligència" capaç de decidir quan l'energia s'ha d'emmagatzemar o quan s'ha de consumir per tal de satisfer les necessitats de la via (sense ell només es podria guardar l'electricitat a les bateries).(32)

Està equipat de diferents sensors que faciliten les condicions ambientals a la CPU perquè aquesta estipuli el que s'ha de fer amb l'energia:

- Sensor pas de vehicles
- Sensor pluja
- Sensor lluminós
- Sensor temperatura i humitat

Tots ells aniran connectats a un Arduino, element que actua com a CPU i que a través dels sensors, detectarà la meteorologia i controlarà l'encesa. Si bé la centraleta haurà d'estar les 24 hores del dia alimentada (consumint part de la potència de les bateries), s'espera que l'energia recol·lectada final pugui abastir tota la demanda.

El diagrama de flux que segueix el sistema en qüestió s'ha realitzat amb el programa *draw.io* i ve representat en la següent il·lustració:



Il·lustració 59: Diagrama que segueix el sistema electrònic. Font pròpia

## 6. Propostes de millora i optimització

Tot seguit, es procedeix a la implementació de totes aquelles idees que s'ha pensat paral·lelament mentre es feia els apartats anteriors, i amb les quals es busca aproximar-se a un major rendiment de l'aparell en els diferents escenaris exposats.

Anàlogament, s'aspira a concebre petites modificacions que resultin més eficients i mantinguin majoritàriament l'esquelet principal del prototip per tal que l'evolució cap a l'optimització sigui el màxim de senzilla possible.

Principalment es pretén estudiar aspectes relacionats amb el sistema mecànic i el seu mode d'operació, però també es proposa la introducció a l'experiment de circuits que encara no s'han pogut examinar.

Abans d'introduir cadascun d'aquests termes, resulta transcendent parlar del transductor piezoelèctric que s'emprarà: del mètode d'utilització, riscos, implementació a la platina i informació general per tal que no es vegi afectada la interfície i els resultats obtinguts siguin màxims. El transductor del que es disposa és el P-876.A12 de PI CERAMICS, empresa alemanya que es dedica a la producció d'elements piezo-ceràmics com actuadors o sensors.(33)

- Perills:

1. No tocar els actuadors durant l'operació ja que es poden arribar a voltatges suficientment elevats com per provocar lesions.

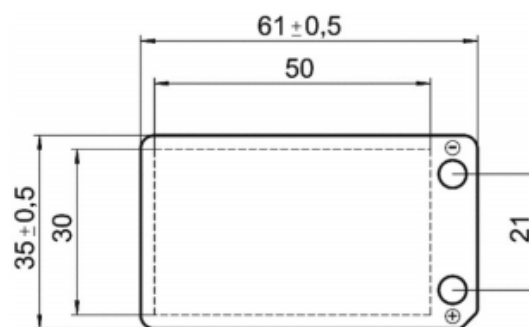
- A tenir en compte:

1. No excedir els voltatges màxims especificats.
2. Evitar el contacte del transductor amb materials conductors.
3. No aplicar forces de flexió majors que les permeses, en cas contrari es podrà arribar a trencar.
4. No extreure el material polimèric que es troba a la superfície, doncs aquest permet un estabilització mecànica i té propietats aïllants.
5. Extreure les precaucions alhora del pegat a la làmina, utilitzant adhesius.
6. No sobrepassar els nivells de temperatura establerts pel fabricant (temperatura de Curie), ja sigui durant la curació tèrmica de l'adhesiu, la soldadura dels cables elèctrics o l'operació.
7. Assegurar que les dimensions del transductor concordin i afavoreixin l'enganxat.



Taula 10: Especificacions del P-876.A12. Font {4}

	Operating voltage range	Min. lateral contraction	Rel. lateral contraction	Blocking force	Dimensions	Min. bending radius	Piezo ceramic height	Electrical capacitance
	V	$\mu\text{m/m}$	$\mu\text{m/m/V}$	N		mm	$\mu\text{m}$	nF
P-876.A11	-50 to 200	400	1.6	90	61 mm × 35 mm × 0.4 mm	12	100	150
P-876.A12	-100 to 400	650	1.3	265	61 mm × 35 mm × 0.5 mm	20	200	90
P-876.A15	-250 to 1000	800	0.64	775	61 mm × 35 mm × 0.8 mm	70	500	45
P-876.SP1	-100 to 400	650	1.3	280	16 mm × 13 mm × 0.5 mm	—	200	8



Il·lustració 60: Dimensions del transductor utilitzat. Font: [33]

▪ Aspectes favorables:

1. És beneficiós, l'adhesió en superfícies dures i capaces d'evacuar calor generat.
2. Per un correcte fixat del cablejat, és recomanable que, després de pelar el cable, es girin els filferros entre si i s'escurci fins als 2mm de longitud.

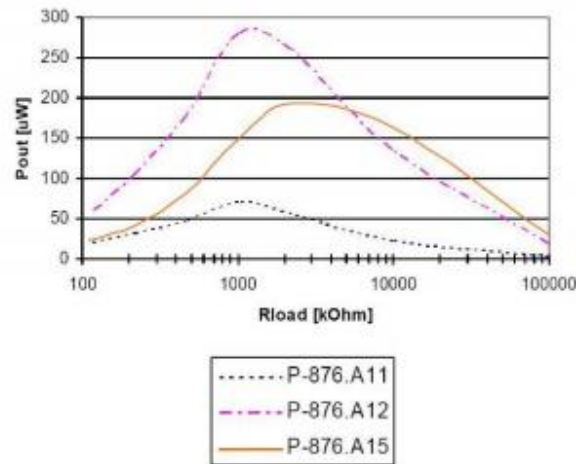


Il·lustració 61: Preparació del cable per una bona soldadura. Font: [34]

Tot i que no sempre es llegeix les instruccions d'aplicació i semblen temes obvis, seguint cada un dels passos meticulosament, es pot allargar la vida útil de la peça, conservar a la perfecció les propietats inicials, evitar danys i arribar a nivells òptims pel que fa a la recollida d'energia.

Una vegada fet això i tenint assegurat un bon treball del pegat, ja es pot procedir a buscar els paràmetres que segons els estudis del fabricant, fan que els valors de sortida siguin màxims.(34)

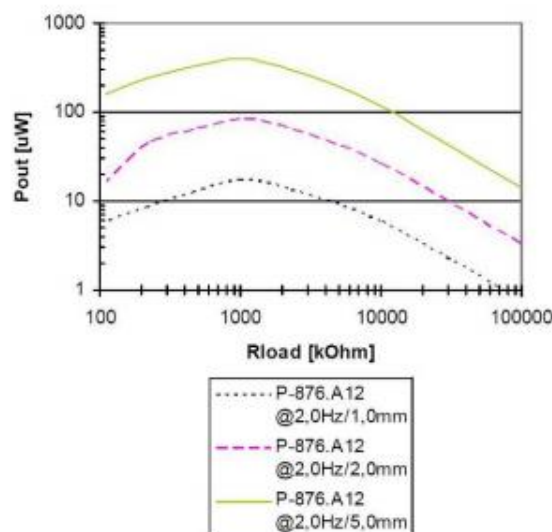
Pi Ceramics facilita varies gràfiques per tal de mostrar en quins rangs, els seus models prenen els millors valors. En el primer cas, s'analitza el comportament de diferents resistències quan són excitades a 1 Hz i una amplitud de 5 mm, i les potències de sortida són les següents:



Gràfica 12: Potència de sortida en funció de la resistència per diferents models. Font: [35]

És fàcilment apreciable que la potència màxima ve donada pel transductor que es fa servir en aquest projecte (P-876.A12), i que s'enfila fins als 285  $\mu\text{W}$  aproximadament quan la impedància és equivalent a 1  $\text{M}\Omega$ .

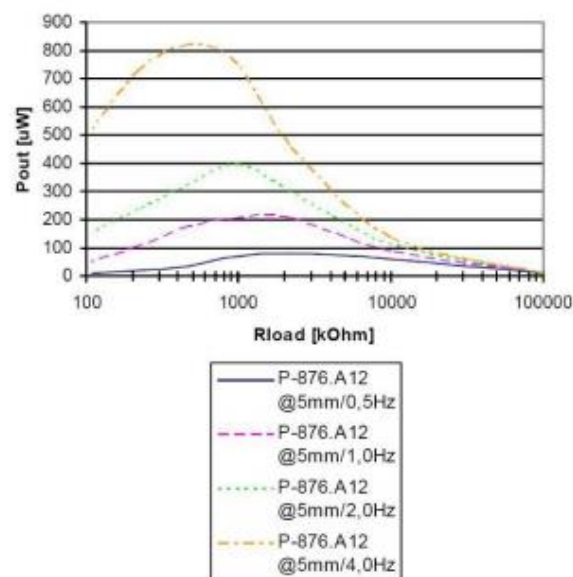
A continuació, es representa la potència de sortida, però aquesta vegada en funció del desplaçament mecànic, que al augmentar, també provoca un ascens del valor de la càrrega resistiva. L'experiment s'efectua amb una freqüència constant igual a 2 Hz.



Gràfica 13: Potència de sortida en funció de les condicions d'excitació. Font: [35]

De la gràfica 13, es pot apreciar que hi ha una relació directament proporcional entre l'amplitud i la potència generada, és a dir, a mesura que incrementa l'excitació mecànica, també ho fa la potència. Cal remarcar que, com s'ha comentat prèviament, no es pot sobrepassar els límits establerts ja que sinó es pot arribar a provocar la ruptura del peça.

Finalment, s'adjunta una última gràfica on s'obté la potència de sortida en funció de l'últim paràmetre a variar: la freqüència. En aquest experiment és manté l'amplitud a 5 mm.



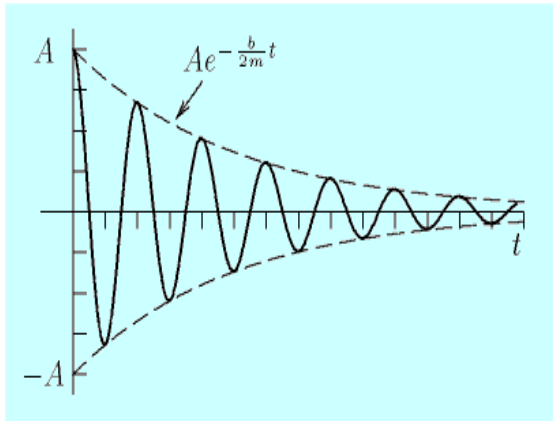
Gràfica 14: Potència de sortida en funció de la freqüència. Font: [35]

Igual que l'anterior anàlisi, aquí es té una relació d'efecte directe entre les dues magnituds estudiades, però en aquest cas, l'augment és de forma més lineal (donat que està representat amb una escala logarítmica en l'eix d'abscisses). D'aquesta gràfica es pot extreure que el valor òptim pren un valor superior als 800  $\mu W$  quan les condicions són de 5 mil·límetres d'amplitud, 4 Hz i uns 550  $k\Omega$ .

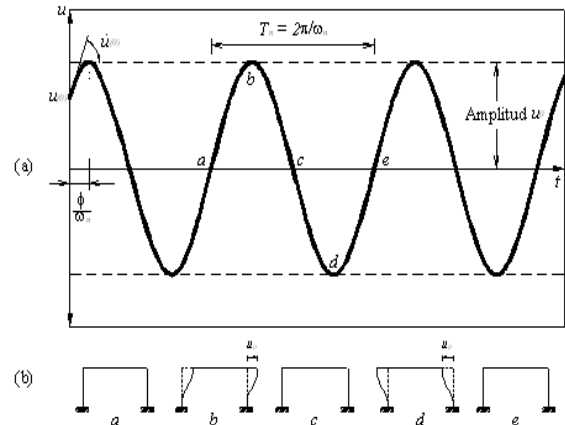
## 6.1. Estudi de l'eficiència en diferents casos

Aquest punt és probablement el més complex de tots els que s'exposen a continuació, i en el que s'hi posarà més èmfasi.

Recopilant informació de TFGs anteriors, es va poder comprovar pràcticament, que en els casos on l'excitació de la platina era lliure, el transductor piezoelèctric era més eficaç que si la pertorbació era forçada. Perquè s'entengui millor, s'adjunten dos fotos que defineixen els dos processos descrits i s'expliquen breument:



Il·lustració 63: Amplitud descrita en una vibració lliure.  
Font: [36]

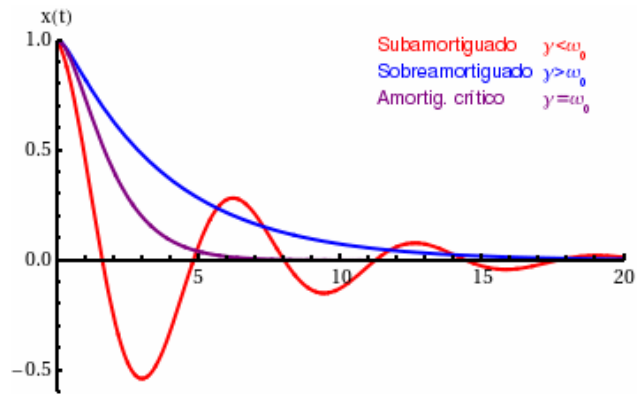


Il·lustració 62: Amplitud descrita per una vibració forçada.  
Font: [37]

- Vibració lliure amortitzada: Aquest tipus de pertorbació es caracteritza perquè només rep un impuls inicial, just el moment en què l'amplitud pren valor màxim. És a partir d'allà, on les forces de deformació internes del propi material i les de fregament amb l'ambient, provoquen una amortització que va limitant l'amplitud de forma exponencial. El temps d'amortització és el temps que tarda l'element vibrant a cessar completament la vibració (amplitud igual a zero). Aquest moviment té una freqüència associada que es manté en cada instant de temps.(35)

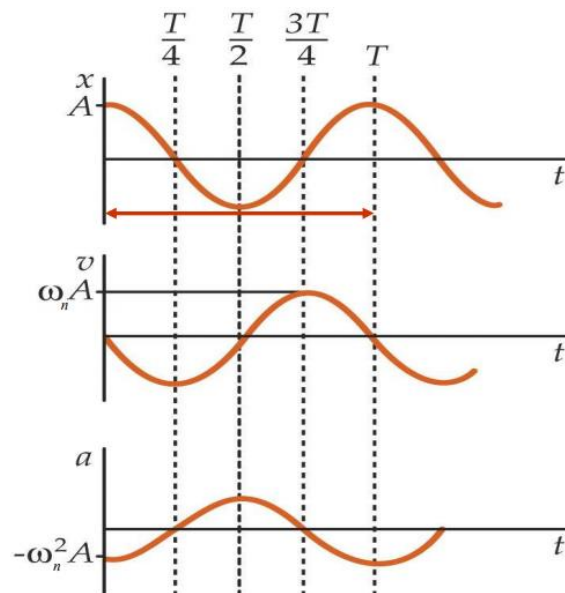
Dins d'aquesta vibració, tenim 3 tipus diferents d'amortitzacions:(36)

1. Subamortitzat: es du a terme quan la força dissipativa és petita en comparació amb la força de restitució. El moviment oscil·latori es manté però l'amplitud va decaient.
2. Sobreamortitzat: el moviment oscil·latori no succeeix, ja que l'esmortiment és elevat.
3. Amortització crítica: és aquella que es troba en el punt estàtic, és a dir, l'esmortiment és l'exacte com perquè l'element arribi el punt d'equilibri sense oscil·lar gens. Qualsevol variació d'aquest estat, té com a conseqüència la transició a una de les altres dos amortitzacions.



Il·lustració 64: Diferents tipus d'amortització lliure. Font: [37]

- Vibració lliure no amortitzada o forçada: L'oscil·lació definida dibuixa una ona sinusoïdal en els eixos de coordenades, mantenint constant l'amplitud, que ve marcada per la força inicial establerta. Normalment, les vibracions forçades s'imposen en sistemes ideals en què les forces explicades en l'altre cas es consideren menyspreables, o en sistemes on hi ha una força periòdica que "obliga" que l'element no variï el seu desplaçament mecànic.(37)
- Aquest, és el mode que es replica inicialment en el prototip gràcies a la lleva dentada.



Gràfica 15: Ones descrites en una vibració forçada de posició, velocitat i acceleració respectivament. Font: [38]

Als assajos duts a terme, es va examinar platines de diferents materials, longituds i estats d'excitació (forçat i lliure), i a continuació es presenta algunes de les taules i gràfiques elaborades amb Excel i les conclusions que se n'extreuen.

D'altra banda, és cabdal introduir i argumentar les fórmules utilitzades abans de mostrar els resultats:

Hi ha termes com la longitud, l'amplitud, les resistències i la freqüència que vénen definits directament, ja sigui perquè els aparells i sensors marquen els seus valors, o perquè són buscats i establerts pels executors. Però la resistència equivalent, la potència i l'efectivitat són paràmetres a calcular, i tot seguit s'explica els passos a prendre.

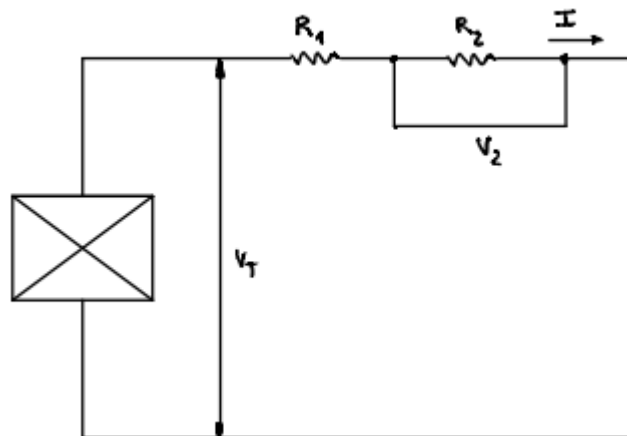
En el cas de les resistències, donat que les 2 estan en sèrie, l'equivalent serà la suma d'ambdues:

$$R_{eq} = R_1 + R_2$$

Quant a la potència, es distingeixen tres tipus:

- Generada: com bé indica el seu nom, és la creada per la flexió del mecanisme, i es té compte com si tan sols es dugués a terme 1 segon. És un valor aconseguit a través dels sensors i no es precisa de càlculs numèrics.
- Sistema: és l'energia necessària que se li ha d'aplicar al conjunt de la platina amb el transductor, per tal que l'amplitud sigui la desitjada.
- Piezoelèctric: aquesta és l'energia indispensable per doblegar només el pedaç piezoelèctric, que sempre serà més petita que l'anterior.

L'energia generada prové de la deducció següent, imaginant que el circuit elèctric és:



Il·lustració 65: Esquema del circuit elèctric després del transductor. Font pròpia

Es parteix de la Llei d'Ohm, i es busca saber la potència total. Se sap  $R_1$ ,  $R_2$  i  $V_2$ , on la segona resistència pren un valor molt més baix que la primera per impedir que la caiguda de potencial mesurada sigui més gran de 10 V i espatlli la màquina adquiridora de dades.

$$P_T = \frac{V_T^2}{R_T} \quad ; \quad I = \frac{V_2}{R_2} \quad ; \quad V_1 = I \cdot R_1 \quad ; \quad V_T = V_1 + V_2 \quad ; \quad R_T = R_1 + R_2$$

Arreglant i ordenant les expressions, queda:

$$P_T = \frac{(V_2 + \frac{V_2}{R_2} \cdot R_1)^2}{R_1 + R_2} \rightarrow P_T = \frac{(V_2 \cdot (\frac{R_1}{R_2} + 1))^2}{R_1 + R_2}$$

Mentre que les expressions per trobar el valor de potència del sistema i el piezoelèctric són respectivament:

$$P_{sist} = \frac{3 \cdot E_{al} \cdot I_{plat} \cdot A^2}{2 \cdot L_{plat}^3 \cdot \frac{1}{f}}$$

$$P_{piezo} = \frac{3 \cdot E_{piezo} \cdot I_{piezo} \cdot d^2}{2 \cdot L_{piezo}^3 \cdot \frac{1}{f}}$$

On:

- $E_{al}$  és el mòdul de Young de l'alumini; material usat per conformar la platina.
- $I_{plat}$  és la inèrcia de la platina calculada a partir de les seves dimensions.
- $A$  és l'amplitud que recorre el punt més oscil·lant de la platina.
- $L_{plat}$  és la longitud de la platina.
- $f$  és la freqüència d'oscil·lació.
- $E_{piezo}$  és el mòdul de Young del material amb el que està fet el transductor.
- $I_{piezo}$  és la inèrcia del pedaç calculat gràcies a les dimensions de la il·lustració 60.
- $d$  és el desplaçament mecànic més gran del transductor (amplitud).
- $L_{piezo}$  és la longitud del pedaç.

En termes d'eficiència, caldrà comparar les 3 potències entre si i d'aquesta manera s'obtindrà 2 valors d'eficàcia:

- Eficiència entre l'input necessari per accionar el sistema, i el generat:

$$eficàcia (\%) = \frac{P_{generada} \cdot 100}{P_{sistema}}$$

- Eficiència entre l'input necessari per accionar el piezoelèctric, i el generat:

$$eficàcia (\%) = \frac{P_{generada} \cdot 100}{P_{piezo}}$$

A partir d'aquí, es processen un total de 144 experiments realitzats amb anterioritat en el TFG del Jordi Ortega, dels quals surten 12 taules com aquesta:(38)



L_total(mm)	R1 (ohm)	R2 (ohm)	R_consum	Potencia (uW)	A (mm)	E_input (uJ)	Efectivitat (%)	E_input(uJ)	Efectivitat (%)	f (Hz)
300	220000	10000	230000	2377,193637	2,24	5120000	0,046429563	207374,863	0,11463268	3,84615385
300	220000	10000	230000	2600,501522	2,24	7733112	0,033628137	313213,486	0,08302649	5,80912863
300	220000	10000	230000	2423,09753	2,24	10218755	0,023712257	413889,25	0,05854459	7,67634855
300	390000	12000	402000	1,17218436	2,24	5076610,2	2,30899E-05	205617,449	5,7008E-05	3,81355932
300	390000	12000	402000	1122,722984	2,24	7765333,3	0,014458143	314518,543	0,03569656	5,83333333
300	390000	12000	402000	968,3736746	2,24	10218755	0,009476435	413889,25	0,02339693	7,67634855
300	560000	10000	570000	1477,945215	2,24	5033949,6	0,029359555	203889,571	0,07248753	3,78151261
300	560000	10000	570000	1199,075721	2,24	7733112	0,015505733	313213,486	0,03828302	5,80912863
300	560000	10000	570000	765,1842391	2,24	10176529	0,007519108	412178,964	0,01856437	7,6446281
300	820000	18000	838000	753,3884179	2,24	5033949,6	0,014966149	203889,571	0,03695081	3,78151261
300	820000	18000	838000	596,4407478	2,24	7830588,2	0,007616806	317161,556	0,01880558	5,88235294
300	820000	18000	838000	553,2944461	2,24	10196426	0,005426357	412984,834	0,01339745	7,65957447

Il·lustració 66: Tipus de taula realitzada en Excel per l'estudi d'eficàcia. Font pròpia

Ara sí, ja podem presentar els resultats resumits en 4 taules. Per demostrar la major eficàcia (només es posa l'eficàcia donada respecte l'input del sistema ja que les dues són pràcticament iguals), es valora en diferents escenaris la comparació entre els dos tipus d'excitació, en tots ells, l'energia s'obté avaluant un segon:

1. Per una platina d'alumini amb excitació forçada, longitud 300 mm, amplitud 2,24 mm, l'efectivitat en funció de la resistència equivalent i la freqüència és:

Taula 11: Relació efectivitat amb freqüència i resistència en excitació forçada i platina d'alumini. Font pròpia

Freqüència (Hz)	Resistència (kΩ)	Efectivitat (%)
3,85	230	0,0464
	402	$2,31 \cdot 10^{-5}$
	838	0,0150
5,81	230	0,0336
	402	0,0145
	838	0,0076
7,68	230	0,0237
	402	0,0095
	838	0,0054

2. Per una platina de polímer amb excitació forçada, longitud 300 mm, amplitud 2,24 mm, l'efectivitat en funció de la resistència equivalent i la freqüència és:

Taula 12: Relació efectivitat amb freqüència i resistència en excitació forçada i platina de polímer. Font pròpia

Freqüència (Hz)	Resistència (kΩ)	Efectivitat (%)
1,45	120	$3,06 \cdot 10^{-4}$
	220	$3,59 \cdot 10^{-4}$
	1000	$2,12 \cdot 10^{-4}$
2,5	120	$5,04 \cdot 10^{-4}$
	220	$5,58 \cdot 10^{-4}$
	1000	$3,36 \cdot 10^{-4}$
3,40	120	$7,26 \cdot 10^{-4}$
	220	$7,67 \cdot 10^{-4}$
	1000	$4,61 \cdot 10^{-4}$

3. Per una platina d'alumini amb excitació lliure, longitud 300 mm, freqüència 21,8 Hz, l'efectivitat en funció de la resistència equivalent, l'amplitud i el gruix de la platina és:

Taula 13: Relació de l'efectivitat amb la resistència, gruix i amplitud en excitació lliure i platina d'alumini. Font pròpia

Resistència (kΩ)	Gruix (mm)	Amplitud (mm)	Efectivitat (%)
230	5	0,56	15,40
	10	1,12	5,69
	15	1,68	1,94
402	5	0,56	14,98
	10	1,12	5,71
	15	1,68	4,18
838	5	0,56	4,79
	10	1,12	2,50
	15	1,68	1,95

4. Per una platina de polímer amb excitació lliure, longitud 300 mm, freqüència 21,8 Hz, l'efectivitat en funció de la resistència equivalent, l'amplitud i el gruix de la platina és:

Taula 14: Relació de l'efectivitat amb la resistència, gruix i amplitud en excitació lliure i platina de polímer.  
Font pròpia

Resistència (kΩ)	Gruix (mm)	Amplitud (mm)	Efectivitat (%)
120	7,5	0,84	2,48
	15	1,68	1,77
	22,5	2,52	1,57
220	7,5	0,84	3,39
	15	1,68	2,16
	22,5	2,52	1,88
1010	7,5	0,84	0,62
	15	1,68	0,50
	22,5	2,52	0,42

En aquestes taules, s'ha utilitzat les dades més dispars possibles per a poder visualitzar quin és el comportament en diferents situacions, però també s'ha intentat buscar valors que fossin el més equivalents possibles. Algunes de les fulles d'Excel, queden adjuntades als annexes.

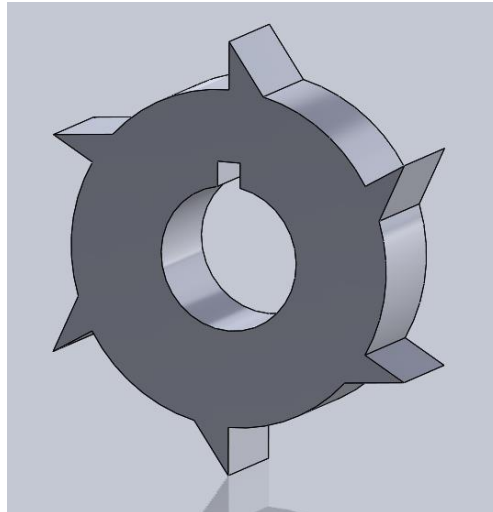
Pel que fa a la interpretació, es pot veure clarament com en els casos d'excitació lliure, l'eficiència és molt més elevada que la forçada, aproximadament de l'ordre de 100 unitats més gran. Això pot ajudar en la recollida d'energia, assolint nivells de potència que facin possible la viabilitat del projecte, tot i que en aquest camp no s'ha explorat gaire i abans de dissenyar un mecanisme complet caldria saber les opcions més òptimes.

#### 6.1.1. Optimització de la lleva

Per tal de poder implementar una vibració lliure al prototip ja existent, es decideix prendre dues mesures que siguin el més senzilles possibles i compleixin amb l'objectiu final:

- Configuració de la nova lleva
- Extracció de la molla de l'ànima

S'ha d'aconseguir que la lleva provoqui un impuls inicial a l'ànima i que aquesta vibri lliurement fins que el moviment sigui nul. Serà aleshores quan una nova dent de la lleva haurà de tornar a impulsar el mecanisme. Per fer-ho, es dissenya la següent lleva:

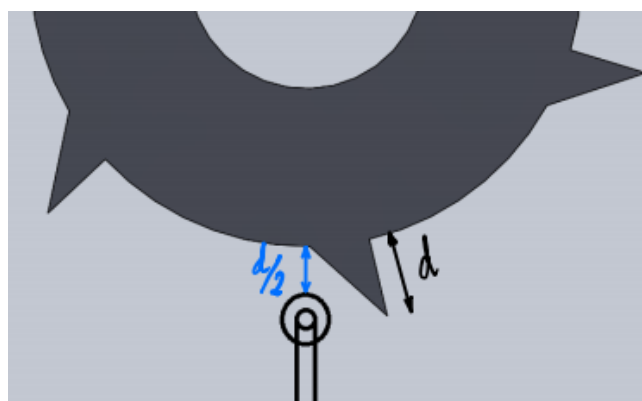


Il·lustració 67: Lleva optimitzada. Font pròpia

Aquesta lleva manté el diàmetre interior per tal que l'acoblament amb l'eix transmissor sigui el correcte i respecti les toleràncies. Com es pot apreciar, es diferencia amb l'inicial en el fet que no hi ha radis de curvatura a les dents, sinó que ara les dents, són triangles rectangles on la hipotenusa i el catet llarg formen un angles de  $35^\circ$ .

Les noves dents estan orientades en un sentit específic, de manera que la cara inclinada faciliti el gir i no creï un moment resistiu massa gran. També es disminueixen el número de dents respecte l'anterior lleva (aquesta en té 6) ja que en aquest nou règim, s'ha d'esperar a què les platines s'esmoreixin completament abans de tornar-les a excitar.

Així mateix, cal ressaltar que la col·locació de l'ànima varia; doncs ara el coixinet no tocarà la secció transversal de la lleva sinó que, apareix una distància entre ambdós elements. Com que l'ànima oscil·larà amunt i avall, ha d'haver-hi un cert espai per a què l'amplitud sigui la desitjada i no sorgeixin perturbacions. La representació seria:



Il·lustració 68: Distància acotada entre el coixinet i la lleva. Font pròpia

Si la distància del catet llarg és " $d$ ", l'espai que hi ha d'haver entre el radi exterior del coixinet i el radi exterior de la lleva és  $d/2$ , valor que prendrà l'amplitud d'oscil·lació.

Dintre d'aquest disseny, s'hauria d'optimitzar paràmetres com:

- La inclinació de les dents
- El número de dents
- La distància entre dents

La inclinació de les dents és important ja que una pendent massa aguda, provoca una frenada considerable (i per tant una disminució de l'efectivitat), per contra una pendent poc pronunciada, donaria peu a una disminució obligada del temps d'amortiment (ja que quan menys inclinació, més ocupació de l'espai). Experimentalment, s'hauria de mesurar el temps d'amortiment (o damping<sup>2</sup>) de les platines per tal de calcular el número de dents i la separació entre elles (sabuda la velocitat angular a la que gira l'eix).

En aquest projecte no es durà a terme directament aquests assajos perquè es prioritza altres aspectes, però de tota manera s'aprofiten anàlisis anteriors.

Quant a la molla de l'ànima, la seva funció com ja s'ha explicat, és forçar el retorn de tot el conjunt (ànima i platines) a la posició de repòs; però el que es pretén ara, és que el moviment sigui el més "natural" possible després de cada impuls. Així doncs, al treure-la, s'aconsegueix que la vibració lliure i periòdica (fins que la inèrcia s'esgota) es pugui implementar.

Per fer un petit resum de com funciona aquest nou sistema, es pot dir que ara, la posició de repòs es troba a una certa distància de la lleva (concretament a la meitat de la que mesura el catet). Una vegada el sistema de captació rep la força externa i aquesta és transmesa fins a l'eix, la lleva gira fins a topar amb la hipotenusa de la dent; és en aquell moment quan es comencen a flexionar les platines fins el punt màxim: el vèrtex del triangle.

Arribat aquest punt, on l'ànima es troba en la posició més baixa possible, és quan començarà la vibració lliure amortitzada: la lleva segueix girant, i l'ànima (degut a les forces internes de les platines i la seva inèrcia) passa ràpidament a l'altre extrem: el punt més alt en el qual gairebé el coixinet toca amb el radi extern de la lleva.

La idea central d'aquest nou mètode, és que la vibració és produïda per un impuls inicial i que són les pròpies platines que amb la tendència a tornar al seu punt d'equilibri, generen l'oscil·lació amortida.

Aprofitant que s'ha dissenyat una lleva amb la intenció d'assolir una vibració lliurement amortitzada, es pretén optimitzar els paràmetres introduïts prèviament (temps esmortiment, número de dents i distància entre elles).

Per començar, s'ha de realitzar un estudi pràctic i apuntar el temps que tarda la platina en deixar de vibrar donada una amplitud inicial. Després, es podria precisar millor el

---

<sup>2</sup> Damping: terme anglès que fa referència al temps que tarda l'element excitat, a tornar al punt d'equilibri.

damping de les làmines provocat per les dents de la lleva, i una vegada fet això, seria possible calcular el numero de dents que tindria.

Aquest temps, ve marcat pel factor d'esmoreïment, que és unidimensional i descriu com les oscil·lacions decauen en un sistema després de ser pertorbat. Només es pot mesurar experimentalment i ve denotat pel símbol  $\zeta$ . (39)

El punt clau perquè el sistema sigui el més eficaç possible, és que, just quan s'acabi d'esmoreir el moviment, la platina torni a impactar amb una dent, d'aquesta manera, s'augmenten el numero d'impulsos per unitat de temps. A la imatge següent, es dibuixa el moviment descrit que es veuria a un oscil·loscopi:



Il·lustració 69: Sistema de damping òptim. Font pròpia

Pot passar que no sigui possible aconseguir un sistema tan exacte degut a què el radi de la lleva no és variable, i aleshores, la distància entre les dents (que és homogènia) i la velocitat angular a la que gira la lleva, no concordin amb el damping perfectament. En aquest cas s'haurà de tendir sempre a rebaixar el numero de dents, ja que es vol evitar de totes maneres que la dent colpegi a la platina mentre aquesta encara està vibrant, fet que provocaria una pèrdua d'energia.

Si es disposa d'un sistema sobredimensionat, el resultat és aquest:



Il·lustració 70: Sistema de damping sobredimensionat. Font pròpia

Com es pot apreciar en aquest escenari, hi ha uns segons en cada període de temps, on les làmines estan completament esmoreïdes, just abans de què la següent dent les impulsi de nou. El sistema doncs, no implica gairebé cap descens de l'eficiència mecànica.

#### 6.1.2. Càlculs teòrics dels paràmetres de lleva

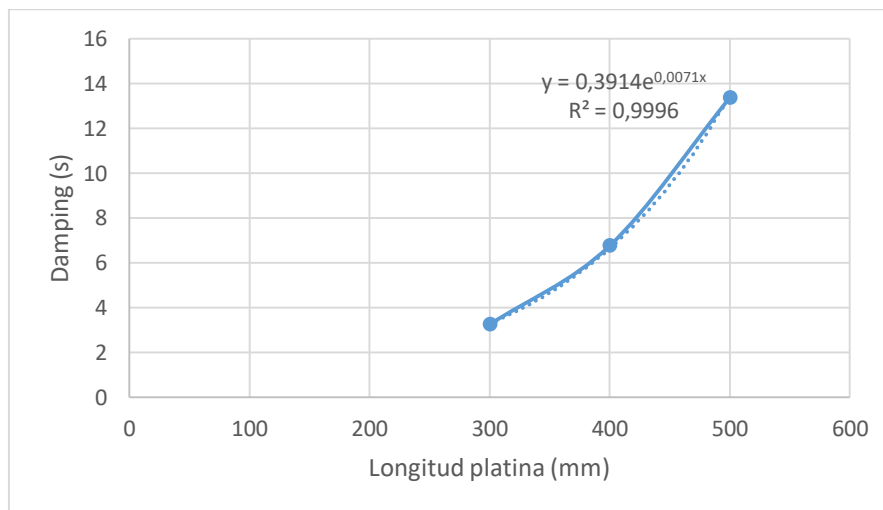
Rescatant anàlisis que s'havia fet anteriorment a la UPC, es troba diverses proves on s'examina el comportament d'una platina al ser excitada amb vibració lliure amortitzada. Els experiments es realitzen amb 3 longituds diferent de platina: 300, 400 i 500 mil·límetres.

La primera variable a esbrinar és el damping de la platina equipada, però com que és més curta que les 3 estudiades, abans s'haurà de trobar el temps d'amortiment d'aquestes. Per fer-ho, es parteix del moment que  $\frac{1}{2}$  de l'amplitud és 0,2 cm (perquè coincideixi amb el cas del prototip real) i es marca el temps que tarda en arribar a 0,02 cm, és a dir, quan l'amplitud final és el 10% de l'inicial. Els resultats són els següents:

*Taula 15: Damping en funció de la longitud de la platina d'alumini. Font pròpia*

Longitud platina (mm)	Damping (s)
300	3,245
400	6,76
500	13,37

Al realitzar la gràfica d'aquesta taula i inserint l'equació de la corba, es té:



*Gràfica 16: Damping en funció de la longitud. Font pròpia*

L'equació de la corba de tendència, amb un coeficient de determinació ( $R^2$ ) 0,9996 que indica un ajust gairebé perfecte, és doncs:

$$y = 0,3914 \cdot e^{0,0071x}$$

Com es detalla a l'últim paràgraf de l'apartat 5.4.4.3, la longitud de la platina total en aquest projecte és de 93 mm, ja que es necessita una petita part per subjectar-la. Si s'introdueix aquest valor a l'expressió, queda:

$$y = 0,3914 \cdot e^{0,0071 \cdot 93} = 0,7575 \text{ (s)}$$

Arribat a aquest punt, s'ha de veure si és viable fer coincidir aquest temps amb el pas de cada dent la lleva. De càlculs anteriors se sap que en les condicions inicials la velocitat angular de la lleva és:

$$w_{LL} = 22,94 \text{ rad/s}$$



Per tant, en 0,7575 segons, la lleva recorre:

$$\Delta\theta = 22,94 \left( \frac{rad}{s} \right) \cdot 0,7575(s) = 17,38 \text{ rad}$$

$$n^{\circ} \text{ voltes} = \frac{17,38(rad)}{2\pi} = 2,77 \text{ voltes}$$

Si el numero de voltes que dona la lleva en 0,7575 segons és superior a 1, és impossible que la dent no colpegi a la platina abans de què aquesta s'hagi amortit completament; per tant doncs, no és viable en aquestes condicions d'excitació.

Per evitar aquest problema, hi dues possibles solucions:

1. Augmentar el radi de la lleva
2. Disminuir el temps d'esmortiment de la platina
3. Augmentant el radi del pinyó

Augmentant el radi de la lleva, no es modifica la velocitat angular amb la qual aquesta girarà, però tenint present la igualtat següent, es pot arribar a entendre que tot i així, la platina podria arribar a funcionar com es pretén:

$$w = \frac{v}{r}$$

Mantenint constant la  $w$  i augmentant el valor del denominador ( $r$ ), la conseqüència directa és la reducció de la velocitat lineal de les dents, elevat així el temps de pas.

La segona solució és la més fàcil de comprendre: com que es busca que la platina arribi al punt d'equilibri el més ràpid possible, escollint un altre material més rígid o comprant una platina amb un gruix superior, es pot aconseguir quadrar el model.

Per últim, la tercera opció es basa en alterar el radi del pinyó que engrana amb la cremallera per tal de minvar l'acceleració angular de l'eix transmissor.

$$\alpha_{LL} = \frac{a}{r_{pinyó}}$$

Conservant l'acceleració lineal que imposa la força externa i la relació de palanques, i augmentant el  $r_{pinyó}$  (aprofitant que l'engrenatge està dotat amb 9 pinyons), l'acceleració angular obligatòriament haurà de decaure.

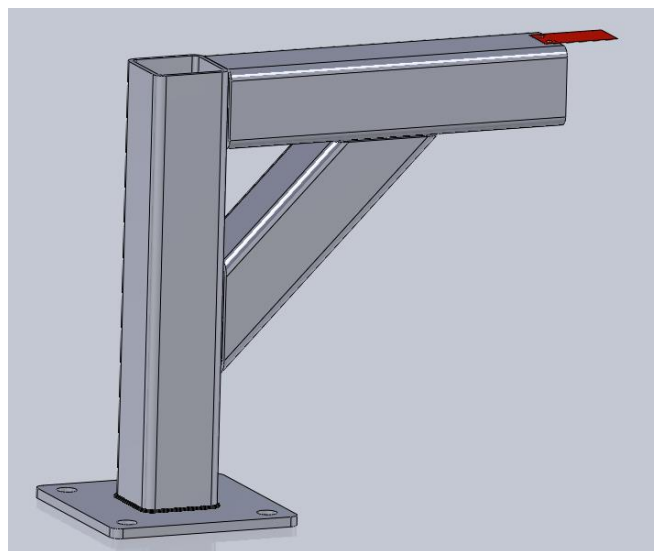
Totes les opcions són compatibles per solucionar l'afer no desitjat, cada una té avantatges i inconvenients, però en el present projecte, el més fàcil d'assolir és el tercer perquè no requereix cap canvi de disseny o material, tot i que s'hauria de recalculer tots els termes amb la fulla d'Excel.

### 6.1.3. Disseny suport de la lleva

En el suposat cas que la lleva que s'ha dissenyat no sigui exactament de les dimensions establertes, per tal que hi hagi una bona col·locació i totes les peces del sistema s'avinguin, es planteja la introducció d'un suport extern perquè l'experiment es pugui dur a terme i l'anàlisi tingui consistència.

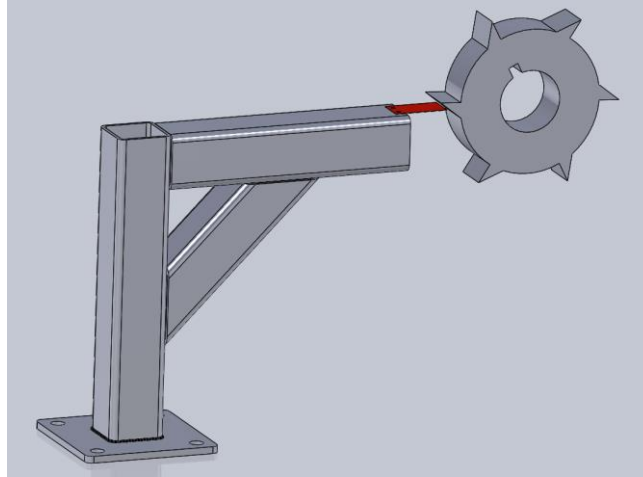
El diàmetre intern de la lleva amb la xaveta on va fixat amb l'eix transmissor, s'ha de mantenir obligatòriament perquè sinó el seu acoblament no és factible; a partir d'aquí, els altres paràmetres (número de dents, inclinació, distància del catet llarg o diàmetre extern de la lleva) queden definits pel constructor.

Per a col·locar-lo, primerament s'haurà de treure tot el sistema de generació; un cop retirat, s'insereix el suport, que és un pilar robust en forma de pòtic, i va encastat al terra de forma que no es balancegi:



*Il·lustració 71: Estructura del suport de la platina en vibració lliure. Font pròpia*

Com figura a la il·lustració anterior, al final del pòtic es fixa només una platina amb el seu transductor piezoelèctric. El funcionament és idèntic al comentat en l'apartat 6.1.1 però amb un matís: al no haver-hi l'ànima, ara es flexiona directament la làmina, i per tant, es disposa horitzontalment com mostra la següent imatge:



Il·lustració 72: Acoblament entre el suport i la lleva. Font pròpia

Aquest fet, no implica alteracions en els resultats de la potència obtinguda, això significa que el valor aconseguit és extrapolable tot multiplicant pel número de piezoelèctrics total (20) i comparant-lo amb l'altre tipus d'excitació.

## 6.2. Optimització teòrica de la relació de la palanca

Un altre caràcter a millorar, és la relació de la palanca preestipulada. En el càlcul de la freqüència natural de les platines, que s'ha demostrat en el punt 5.4.5, no hi ha cap radi existent que pugui assolir aquesta excitació. És per això que es planteja el fet de canviar les distàncies de cada braç de la palanca i fer-ho possible. A continuació es procedeix als càlculs per arribar a aquesta optimització, que seria beneficiós en el cas de l'excitació no amortida, sempre i quan es mantinguin els radis de la lleva i el número de dents:

Es parteix dels mateixos valors calculats en els anteriors apartats, però ara es força que el radi del pinyó sigui el més petit (el més proper) de 0,0265 m:

S'inicia l'optimització trobant l'acceleració de la cremallera:

$$a = \alpha_{LL} \cdot r_{pinyó}$$

$$a = 150,31 \left( \frac{rad}{s^2} \right) \cdot 0,0265(m) = 3,98 m/s^2$$

Ara, ja es pot calcular la distància que recorrerà l'extrem del braç resistent de la palanca, tan sols aïllant de l'expressió ja deduïda:

$$a = \frac{2 \cdot d_2}{t^2} \rightarrow d_2 = \frac{a \cdot t^2}{2}$$

$$d_2 = \frac{3,98 \left( \frac{m}{s^2} \right) \cdot 0,36^2 (s^2)}{2} = 0,258 m$$

Com que hi ha un desplaçament en el punt de suport de la palanca, es passa a tenir dues incògnites:  $l_1$  i  $l_2$ . Per tal de solucionar-ho, es fa un sistema d'equacions molt bàsic, tenint en compte la llei de la palanca i que la barra que la forma, segueix tenint les mateixes dimensions:

$$\left. \begin{aligned} l_1 \cdot d_2 &= l_2 \cdot d_1 \\ l_1 + l_2 &= C \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} 0,258l_1 - 0,0226l_2 &= 0 \\ l_1 + l_2 &= 1,81 \end{aligned} \right\}$$

Aïllant  $l_1$  de la segona igualtat, queda:

$$l_1 = 1,81 - l_2$$

I ara, es substitueix a la primera equació.

$$0,258(1,81 - l_2) - 0,0226l_2 = 0$$

$$0,467 - 0,2803l_2 = 0$$

$$l_2 = 1,664 \text{ m}$$

I per tenir el valor de  $l_1$ , només s'ha d'introduir a l'expressió aïllada prèviament; el resultat és doncs:

$$l_1 = 0,146 \text{ m}$$

En conseqüència, es pot afirmar que, per aconseguir la freqüència fonamental amb un radi de pinyó igual a 2,65 cm, és necessari que el punt de suport es trobi a 0,146 m d'on se li aplica la força (rebuda pel cotxe) i 1,664 m de la cremallera.

### 6.3. Optimització teòrica del volant d'inèrcia

Si qualssevol de les mesures proposades fins ara fossin inversemblants d'aplicar o no es consideressin com a vàlides per arribar a la freqüència natural de les platines que fa més eficient el prototip, es contempla l'opció de modificar el volant d'inèrcia.

Aquesta millora, s'ha d'efectuar a partir de l'equilibri de moments en l'eix transmissor, on es té que:

$$(F_i \cdot r_{pinyó}) - (F_{LL} \cdot r_{LL}) = I_{total} \cdot \alpha_{LL}$$

Com en el anterior cas, s'agafa el radi de pinyó més petit ja que és el més pròxim a aconseguir l'oscil·lació desitjada.

Donat que les forces i els radis segueixen essent els mateixos (ja que es parteix del prototip inicial), els únics factors que segur que variaran, són els dos de la dreta de la igualtat. Sabent això, es farà el procés invers de l'original, és a dir, es recupera l'acceleració angular de l'eix quan les làmines oscil·len en freqüència natural, i a partir d'allà se segueix tots els passos fins a obtenir la inèrcia del volant:

$$\alpha_{LL} = 150,31 \text{ rad/s}^2$$

$$I_{total} = \frac{(F_i \cdot r_{pinyó}) - (F_{LL} \cdot r_{LL})}{\alpha_{LL}}$$

$$I_{total} = \frac{(513,70(N) \cdot 0,0265(m)) - (8,86(N) \cdot 0,0351(m))}{150,31(\text{rad/s}^2)} = 0,0885 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Com era de preveure, la inèrcia total ha de disminuir tenint en compte que, l'acceleració angular quan les platines oscil·len amb freqüència natural és més gran que quan no ho fan, i si un puja, l'altre ha de baixar (els dos termes s'han de compensar).

Ara falta concretar quina és la inèrcia del volant, sabent que les altres no varien. Primer, es comparen les inèrcies totals en els dos casos, i es resten:

$$variació = I_{prèvia} - I_{actual}$$

$$variació = 0,2085(\text{kg} \cdot \text{m}^2) - 0,0885(\text{kg} \cdot \text{m}^2) = 0,12 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Aquesta variació, és la que se li ha de reduir al volant:

$$I_{v_{optima}} = I_{v_{prèvia}} - variació$$

$$I_{v_{optima}} = 0,2076(\text{kg} \cdot \text{m}^2) - 0,12(\text{kg} \cdot \text{m}^2) = \mathbf{0,0876 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}$$

Si resulta fàcil treure-li material a la peça per tal de reduir la massa i, consegüentment la inèrcia, ja és suficient per assolir l'optimització anhelada. En cas contrari, també es pot optar per no aprofitar el volant del que es disposa, i comprar-ne un de nou que compleixi amb els requeriments.

#### 6.4. Optimització teòrica del sistema elèctric

Per a l'optimització del sistema elèctric, es limita a l'estudi teòric dels dos sistemes que més potència generen en condicions favorables: els *Synchronized Switch Harvesting Inductor* (SSHI), tant el *Parallel* com el *Series*. Ambdós sistemes són capaços d'assolir factors de qualitat de 15 en comparació amb el cas més bàsic, l'*Standard Interface*.

Atès que en els anteriors treballs no s'ha pogut analitzar aquests circuits experimentalment, s'intentarà calcular els valors òptims teòrics, i estimar les potències extretes en aquestes condicions.

Primerament, s'ha de fer els càlculs teòrics per saber quins components s'han de comprar.

- **Cas SSHI Parallel:**

Es recupera les fórmules de la tensió continua de la taula 7:

$$V_{dc} = \frac{2 \cdot R_L \cdot \alpha}{R_L \cdot C_0 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w + \pi} \cdot w \cdot U_M$$

$$P = \frac{V_{dc}^2}{R_L}$$

Es comença per calcular el factor de de força:(13)

$$\alpha = \frac{\overline{e_{31}} \cdot A}{L}$$

On  $A$  és l'àrea del piezoelèctric, i  $L$  la llargada i prenen els següents valors (dimensions preses tenint en compte la direcció de la tensió mecànica):

$$e_{31} = -10,4 \text{ C/m}^2$$

$$\text{ample del piezo} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{gruix piezo} = 200 \cdot 10^{-6} \text{ m}$$

$$A = 30 \cdot 10^{-3}(\text{m}) \cdot 200 \cdot 10^{-6}(\text{m}) = 6 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$L = 50 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\alpha = \frac{10,4 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 1,248 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}$$

En l'estat d'excitació mecànica de les platines, s'agafa la freqüència natural ja establerta:

$$\text{freqüència natural} = 68,84 \text{ Hz}$$

$$\text{amplitud mecànica} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Suposant una resistència de 220 kΩ, per diferents valors del factor de qualitat (5, 8 i 13) i tenint en consideració la capacitat elèctrica de 90 nF que estipula el fabricant pel transductor, es genera els càlculs de  $V_{dc}$  i  $P$  dels diferents camps:

$$Q_i = 5 \rightarrow V_{dc} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 1,248 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot 68,84}{220 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 5}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 + \pi} \cdot 2 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{dc(Q_i=5)} = 87,15 \text{ V}$$

$$P_{(Q_i=5)} = \frac{87,15^2}{220 \cdot 10^3} = 0,0345 \text{ W}$$

$$Q_i = 8 \rightarrow V_{dc} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 1,248 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot 68,84}{220 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 8}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 + \pi} \cdot 2 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{dc(Q_i=8)} = 101,8 \text{ V}$$

$$P_{(Q_i=8)} = \frac{101,8^2}{220 \cdot 10^3} = 0,0471 \text{ W}$$

$$Q_i = 13 \rightarrow V_{dc} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 1,248 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot 68,84}{220 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 13}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 + \pi} \cdot 2 \cdot 10^{-3}$$

$$V_{dc(Q_i=13)} = 115,4 \text{ V}$$

$$P_{(Q_i=13)} = \frac{115,4^2}{220 \cdot 10^3} = 0,0605 \text{ W}$$

Aquesta, seria la potència generada per un sol peça en el *SSHI Parallel Interface circuit* en funció del factor de qualitat, però aquests valors són extrapolables als 20 piezoelèctrics connectats dels que es disposa:

Taula 16: Valors de tensió i potència teòrics en funció del factor de qualitat i el número de peces pel circuit *SSHI Parallel*. Font pròpia

Número piezos	$Q_i$	$V_{dc}$ (V)	P (W)
1	5	87,15	0,0345
	8	101,8	0,0471
	13	115,4	0,0605
20	5	87,15	0,690
	8	101,8	0,942
	13	115,4	1,210

La taula reflexa els valors expressats quan els transductors estan connectats en paral·lel i amb una resistència de 220 kΩ. Aquesta resistència és la òptima per



l'*Standard Interface circuit*, però no pas pel circuit estudiat. Seguidament es realitza doncs, el càlcul de les resistències òptimes en cada cas per aquesta tipologia, i les potències màximes obtingudes a partir de les fórmules ja conegudes:

$$R_{opt} = \frac{\pi}{C_0 \cdot w \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}$$

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 \cdot w}{\pi \cdot C_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)} \cdot U_M^2$$

Introduint els paràmetres com abans, però calculant prèviament la  $R_{opt}$ , s'obté la taula de valors:

Taula 17: Valors de tensió i potència teòrics obtinguts després de calcular la resistència òptima i en funció del factor de qualitat pel circuit SSHI Paralel. Font pròpia

Número piezos	Q <sub>i</sub>	R <sub>opt</sub> (kΩ)	V <sub>dc</sub> (V)	P (W)
1	5	299	102,9	0,0354
	8	453	155,6	0,0535
	13	709	243,7	0,0837
20	5	299	102,9	0,708
	8	453	155,6	1,070
	13	709	243,7	1,674

Segons les dades de la taula mostrada i com ja s'havia argumentat, les resistències òptimes d'aquest circuit, són superiors a les del cas més bàsic.

#### - Cas SSHI Series:

La tensió continua i la potència venen definides per les expressions de la taula 8:

$$V_{dc} = \frac{2 \cdot R_L \cdot \alpha \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w}{2R_L \cdot C_0 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right) \cdot w + \pi \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)} \cdot U_M$$

$$P = \frac{V_{dc}^2}{R_L}$$

Igual com en el SSHI Paralel, els valors d'excitació mecànica i el factor de força són els mateixos, ja que les condicions són idèntiques:

$$\alpha = \frac{10,4 \cdot 6 \cdot 10^{-6}}{50 \cdot 10^{-3}} = 1,248 \cdot 10^{-3} \text{ C/m}$$

$$\text{freqüència natural} = 68,84 \text{ Hz}$$

$$\text{amplitud mecànica} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Seguint el mateix procediment, s'obtenen els voltatges  $V_{dc}$  aplicant una resistència de 220 kΩ i variant la  $Q_i$ :

$$Q_i = 5 \rightarrow V_{dc} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 1,248 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 5}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 5}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 + \pi \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 5}}\right)}$$

$$V_{dc(Q_i=5)} = 26,96 \text{ V}$$

$$P_{(Q_i=5)} = \frac{26,96^2}{220 \cdot 10^3} = 3,304 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$Q_i = 8 \rightarrow V_{dc} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 1,248 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 8}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 8}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 + \pi \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 8}}\right)}$$

$$V_{dc(Q_i=8)} = 27,24 \text{ V}$$

$$P_{(Q_i=8)} = \frac{27,24^2}{220 \cdot 10^3} = 3,374 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

$$Q_i = 13 \rightarrow V_{dc} = \frac{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 1,248 \cdot 10^{-3} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 13}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 220 \cdot 10^3 \cdot 90 \cdot 10^{-9} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 13}}\right) \cdot 2\pi \cdot 68,84 + \pi \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2 \cdot 13}}\right)}$$

$$V_{dc(Q_i=13)} = 27,43 \text{ V}$$

$$P_{(Q_i=13)} = \frac{27,43^2}{220 \cdot 10^3} = 3,420 \cdot 10^{-3} \text{ W}$$

Representat en una taula i afegint els resultats que tindríem amb 20 piezoelèctrics, queda:

Taula 18: Valors de tensió i potència teòrics en funció del factor de qualitat i el numero de pedaços pel circuit SSHI Series. Font pròpia

Número piezos	$Q_i$	$V_{dc}$ (V)	P (W)
1	5	26,96	$3,304 \cdot 10^{-3}$
	8	27,24	$3,374 \cdot 10^{-3}$
	13	27,43	$3,420 \cdot 10^{-3}$
20	5	26,96	0,0661
	8	27,24	0,0675
	13	27,43	0,0684

Seguidament es realitza doncs, el càlcul de les resistències òptimes en cada cas per aquesta tipologia, i les potències màximes obtingudes a partir de les fórmules ja conegudes:

$$R_{opt} = \frac{\pi \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}{2C_0 \cdot w \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}$$

$$P_{max} = \frac{\alpha^2 \cdot w \cdot U_M^2 \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}{2\pi \cdot C_0 \cdot \left(1 - e^{-\frac{\pi}{2Q}}\right)}$$

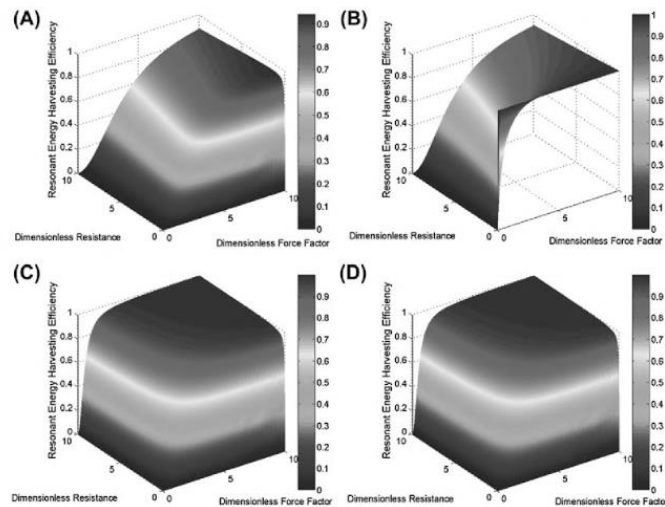
És de preveure, que si primer es calculen les resistències òptimes, els nivells de voltatge augmentaran i es trobaran les potències màximes:

Taula 19: Valors de tensió i potència teòrics obtinguts després de calcular la resistència òptima i en funció del factor de qualitat pel circuit SSHI Series. Font pròpia

Número piezos	$Q_i$	$R_{opt}$ (kΩ)	$V_{dc}$ (V)	P (W)
1	5	6,29	13,867	$3,06 \cdot 10^{-2}$
	8	3,95	13,870	$4,87 \cdot 10^{-2}$
	13	2,43	13,880	$7,90 \cdot 10^{-2}$
20	5	6,29	13,867	0,612
	8	3,95	13,870	0,974
	13	2,43	13,880	1,579

Com era d'esperar, les resistències òptimes són força inferiors als 220 kΩ inicials, i tot i que els voltatges també disminueixen, les potències finals són unes 10 vegades més grans.

Per veure com afecta el factor de força i la resistència en l'eficiència dels 4 circuits i la interacció entre aquests factors, es presenta la següent imatge:



Il·lustració 73: Eficàcia ressonant d'un sol grau de llibertat connectada als quatre tipus de circuit. A) Standard. B) SCE. C) SSHI Paralel. D) SSHI Series. Font: [39]

A força de voler optimitzar el sistema global, s'escullen les resistències amb les quals s'aconsegueixen més watts; aquestes vénen donades quan el factor de qualitat és més gran (de 13). Les impedàncies trobades al mercat que satisfan els requeriments de cada circuit són:

Taula 20: Resistències òptimes a comprar segons el circuit. Font {5} i {6}

Circuit SSHI	Fabricant	Número de l'article	Tensió de treball max.(V)	Resistència (kΩ)	Preu/100 unitats (€)
Paralel	YAGEO	MF0207FTE-715K	350	715	0,0218
Series	YAGEO	MF0207FTE-2K4	350	2,4	0,0230

Un cop s'han trobat les resistències, es calculen les inductàncies de les bobines (L) i capacitàncies (C<sub>r</sub>) per poder implementar les proves experimentals:

Com que tots els pedaços estan connectats entre si en paral·lel, la capacitat total es pot obtenir multiplicant per 20 el valor d'un sol condensador:

$$C_{total} = C_0 \cdot 20$$

$$C_{total} = 90 \cdot 10^{-9} (F) \cdot 20 = 1,8 \cdot 10^{-6} F$$

La freqüència natural de l'oscil·lador elèctric ve referida amb l'equació:

$$w_0 = \frac{1}{\sqrt{C_{total} \cdot L_i}}$$

El factor de qualitat  $Q$  d'un circuit ressonant, és una mesura de l'eficiència amb la qual aquest ressona i reflecteix el quocient que hi ha entre l'energia emmagatzemada i la dissipada. Una altre expressió per trobar aquest factor, és:

$$Q_i = w_0 \cdot \frac{L_i}{R_i}$$

Agrupant les dues igualtats anteriors i simplificant:

$$Q_i = \frac{1}{\sqrt{C_{total} \cdot L_i}} \cdot \frac{L_i}{R_i} \rightarrow Q_i = \frac{1}{R_i} \cdot \sqrt{\frac{L_i}{C_{total}}}$$

Finalment, només queda aïllar el terme que es vol calcular, i avaluar en els distints escenaris. Cal comentar que se suposa una resistència de bobinat igual a 1 ohm.

$$L_i = (R_i \cdot Q_i \cdot \sqrt{C_{total}})^2$$

$$Q_i = 5 \rightarrow L = 4,5 \cdot 10^{-5} H$$

$$Q_i = 8 \rightarrow L = 11,5 \cdot 10^{-5} H$$

$$Q_i = 13 \rightarrow L = 30,4 \cdot 10^{-5} H$$

Quant al càlcul de les capacitats, es calibren a partir de l'energia generada en el pas d'un cotxe, on el temps de generació se suposa de 12 segons. Es prenen els valors més grans de potència assolits pels dos circuits al connectar els 20 piezoelèctrics i aplicant 90% d'eficiència, ja que tant el sistema elèctric com l'electrònic consumeixen una petita part:(13)

$$E = P(W) \cdot t(s)$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2 \rightarrow C = \frac{2 \cdot E}{V^2}$$

Taula 21: Càlcul de les capacitats dels condensadors en cada circuit. Font pròpia

Circuit SSHI	Potència dels piezos (W)	Potència útil final (W)	Energia recollida (J)	Tensió de treball (V)	Capacitat (F)
Parallel	1,674	1,507	18,08	18	0,112
Series	1,579	1,421	17,05	18	0,105

Donat que els dos valors són molt similars, es pren la decisió d'agafar un valor de 0,1 F, i aprofitar el mateix condensador pels dos circuits. Les característiques del condensador són:

Taula 22: Característiques del condensador a comprar. Font {7}

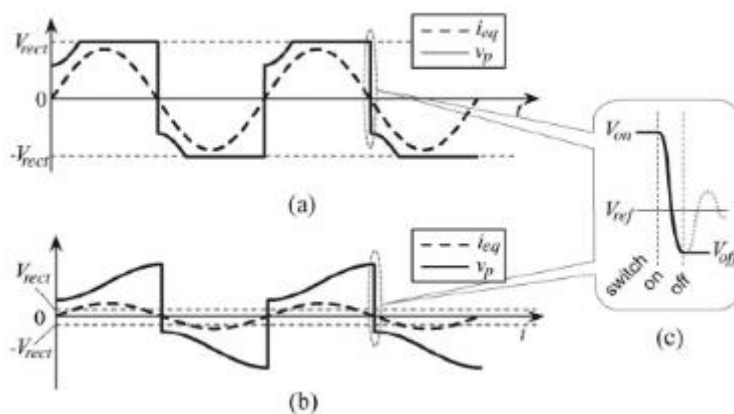
Circuit SSHI	Fabricant	Número de l'article	Tipus de condensador	Capacitat (F)	Preu/ unitat (€)
ambos	KEMET	FYD0H104ZF	electròlit	0,1	0,96

Per acabar, només falta parlar sobre el interruptor “switch”. Aquest element està controlat pel desplaçament de les platines, i per tal d'optimitzar el còmput global, és transcendental que l'interruptor es tanqui quan l'amplitud de les platines pren un valor màxim, i es mantingui en aquest estat un temps concret, molt curt i que ve delimitat per la següent fórmula:

$$t_{switch} = \pi \cdot \sqrt{L \cdot C_p}$$

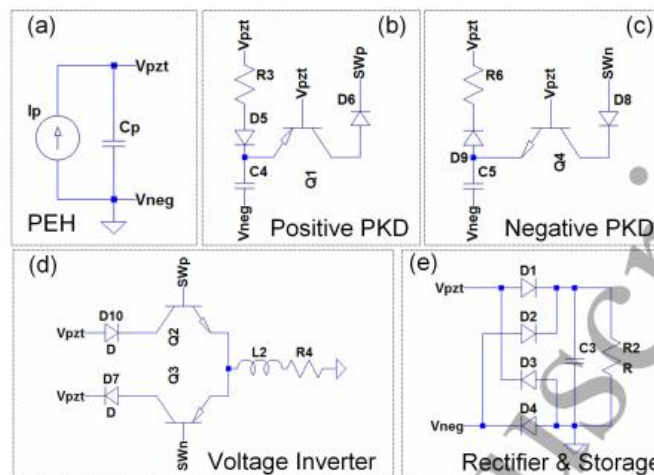
On la  $C_p$  és la capacitat inherent del piezoelèctric.

El temps que tarda a desactivar-se és proporcional a la meitat d'un cicle de capacitat de resistència (RLC) com es mostra a continuació:



Il·lustració 74: Típica gràfica dels dos circuits SSHI. a) Paralel. b) Series. c) inversió en l'instant de màxim desplaçament. Font: [40]

Per fer-ho possible, és necessari un *PKD* (“*peak detection*”) Circuit que detecti el pic de desplaçament, i sigui capaç de commutar en l'instant de temps  $t_{switch}$ . D'aquesta manera, es pot dissenyar una sincronització òptima i aconseguir més potència.(40)



Il·lustració 75: Esquemàtica del circuit SSHI dividit en 5 blocs basats en la seva funció. Font: [41]

La desviació en el temps en la que actua el “switch” és molt important i pot arribar a arruïnar tot el treball realitzat: 1,5 vegades per sobre del  $t_{switch}$ , la potència amb prou feines es veu influenciada, però en el cas contrari (1,5 per sota), la potència varia significativament, i en casos extrems pot ser que la potència obtinguda sigui nul·la. En general, es pot afirmar que, el p-SSHI és molt més dependent d’aquest temps que el s-SSHI.(41)

Una altre possibilitat no tant complexa però que pot resultar efectiva, és la de substituir-ho tot per un interruptor intel·ligent, capaç de commutar en el temps introduït. Si se sap el temps que tarda la platina en passar d’un extrem mecànic a un altre i els segons que ha de tardar en invertir el seu estat l’interruptor, el resultat serà el mateix.

## 6.5. Optimització per la implementació a la via

Tots els càlculs realitzats fins ara, estan pensats per a ser òptims quan el vehicle que circula per sobre la plataforma va a 20 km/h, però què passa si això no es compleix? És indubtable que l’energia de sortida disminuiria bruscament, entre d’altres coses perquè les platines no oscil·larien en la freqüència fonamental.

És per això que cada mecanisme instal·lat a la carretera, haurà d’estar dissenyat per a què els cotxes que hi passin, vagin a una certa velocitat dins d’un rang acceptable.

Un altre aspecte en que afecta la velocitat de l’automòbil en el cas que s’hagi implementat l’oscil·lació lliure amortida, és en la velocitat angular que gira la lleva; si un cotxe va massa ràpid, la lleva s’accelerarà més del compte, però el temps d’esmortiment de les làmines seguirà sent el mateix, i això provocarà que en cada cicle, les platines



xoquin amb la dent quan encara estan vibrant; acció no desitjada per a evitar perturbacions i frenar sobtadament el mecanisme generador.

Per tal d'eliminar una incògnita més del sistema com és la velocitat a la qual arriba el vehicle al prototip, es planteja que la implementació es faci en zones on la velocitat està controlada, com per exemple en vies amb radars de tram o en zones més delicades dins de la ciutat, on es col·loca ressals de reducció de velocitat amb l'objectiu de disminuir els riscos de mort per atropellament.



*Il·lustració 76: Possibilitat d'implementar en radars de tram. Font: [42]*

En el primer dels cassos, la instal·lació seria en trams d'autopista o autovia en què es limita la velocitat entre els 80 i 90 km/h en els 2 o fins i tot 3 carrils més ràpids (de l'esquerra) i aprofitant que és una tècnica que cada vegada es farà servir més. Estadísticament se sap que la majoria dels conductors en aquests trams, van a la màxima velocitat permesa, i revisant les dades que acumulen aquests radars, es podria arribar a saber la velocitat mitjana de tots els vehicles que hi passen; aquesta seria la velocitat amb la qual s'hauria de dissenyar el prototip. A més a més, també podria arribar a tenir la capacitat de radar propi si es perfecciona amb un sistema electrònic específic: si un cotxe sobrepassa la velocitat màxima, el mecanisme es comportarà d'una manera determinada (comentada en l'anterior paràgraf), analitzant aquests efectes i les vibracions, es podria arribar a saber si el vehicle en qüestió va més ràpid del compte.

En el cas que es posi en vies urbanes amb velocitats d'entre els 30 i 50 km/h, es podria esbossar una nova plataforma per tal que fos ella mateixa la que actués com a banda reductora de velocitat. Doncs, a part de generar electricitat, també suposaria una moderació dels preus d'instal·lació, ja que no faria falta excavar tant en el sòl i no s'hi hauria d'abocar material per crear el desnivell.



*Il·lustració 77: Exemple de gual amb tecnologia piezoelèctrica, dissenyat per iBump. Font: [43]*

## 7. Planificació desitjada i preparació dels experiments pràctics

Una vegada s'arribi a l'empresa de Comsa GMF, s'ha de tenir tots els esquemes clars i saber totes les anàlisis i proves que es volen fer. És transcendental doncs una bona feina prèvia per a organitzar les mesures que es volen extreure per a posteriorment, treure conclusions dels resultats obtinguts. Convé destacar que els passos descrits en aquest apartat, no corresponen als assajos descrits més endavant (són merament els teòrics desitjats), i que per tant, és una proposta teòrica de màxims suposant que es té tots els recursos i el temps necessaris per portar-ho a terme.

Tenint en compte que només es tindrà l'oportunitat d'anar-hi dues vegades, cal estructurar bé les idees i tenir tots els passos clars. És per això que de manera paral·lela, es creen les diferents taules que s'ompliran paulatinament.

Aquestes tasques es realitzarien amb els següents punts:

✓ Paràmetres a variar:

1. Velocitat d'entrada del vehicle
2. Radi de l'engranatge de transmissió (del pinyó)
3. Relació de palanca
4. Volant d'inèrcia
5. Resistències del circuit elèctric
6. Lleva (en funció del tipus d'impuls)
7. Extracció de la molla de l'ànima

Es preveu que tots ells podrien ser modificats amb facilitat, però si en cas contrari resultés impracticable perquè els elements estan fixats o no hi ha temps, quedarien pendants pel proper treball.

Fora bo que d'una manera o altre, es pogués fer alguna prova amb l'oscil·lació lliure amortitzada per tal de poder comparar valors de potència finals. Si no es pogués fer traient la molla, es podria fer servir el recurs dissenyat del suport fixat a terra amb una platina a l'extrem superior.

✓ Introducció de sensor o dispositius per mesurar variables:

1. Freqüència d'oscil·lació de les platines
2. Temps amortiment d'una platina
3. Acceleració angular de l'eix
4. Velocitat d'entrada del vehicle
5. Desplaçament vertical de les bigues
6. Temps que la biga està premuda
7. Desplaçament de la palanca (del braç resistent)
8. Amplitud de les platines
9. Voltatge generat pels piezoelèctrics

Alguns dels sensors serien per corroborar que el mecanisme està treballant com s'havia previst a la part teòrica, altres per extreure valors pràctics. La implementació de tots ells durant els assajos, podria ajudar a entendre en quins punts falla el sistema o com seria possible millorar-lo.

La velocitat d'entrada del vehicle seria controlada mitjançant dues piles que actuarien com a interruptors, una situada a l'extrem esquerra de la biga de captació, i l'altra a l'extrem dret. La lectura seria possible gràcies a la connexió de cables elèctrics a l'ordinador. Inicialment, una part d'aquests cables estaria separat del pol de la pila, però en el moment en que el vehicle hi passés per sobre, la pressió rebuda faria que el circuit es tanqués i l'ordinador llegís un senyal elèctric. Passats uns segons, seria l'altra pila la que generaria un corrent; seria llavors quan es podria calcular la velocitat (sabent temps i distància).

Es prepara també amb antelació les taules de cadascun dels assajos amb les cel·les buides, disposades a omplir-se amb dades coherents i que servissin per crear les gràfiques; aquestes taules van adjuntades al document d'annexes.

Per defecte, el circuit elèctric seria el SSHI Series amb resistència equivalent de 3,95 k $\Omega$ .

El disseny de les pràctiques que es realitzarien són:

1. En aquest primer assaig, s'imposaria una velocitat d'entrada i s'observaria com reaccionen els altres paràmetres.
2. En aquest assaig, només s'utilitzaria l'oscil·lació forçada amb les platines vibrant a freqüència fonamental (68,84 Hz) en tots els casos. Per assolir-la, s'hauria d'adequar el radi del pinyó a la velocitat d'entrada.
3. Seguidament, s'estudiaria com afecta la velocitat d'entrada a la freqüència de les platines i la potència final, donat un radi de pinyó (només amb excitació forçada).
4. En aquest cas, s'estudiaria el mateix que el punt anterior, però en comptes de canviar el radi del pinyó, es variaria la massa del volant d'inèrcia:
5. S'analitzaria l'energia recollida d'un sol piezoelèctric en el cas d'impuls lliure, en funció de la llargada de la platina. Tots els altres paràmetres quedarien fixats inicialment.
6. L'últim experiment, es realitzaria tant amb l'impuls lliure com amb el forçat, i s'estudiaria l'energia recollida al variar els circuits elèctrics i les seves resistències equivalents. Tots els altres paràmetres quedarien fixats inicialment.

Es preveu que la totalitat d'aquests experiments no es podrà estudiar, ja que el temps és limitat i el primer dia a l'empresa de Comsa, es dedica a l'observació del muntatge, verificacions tècniques i primeres proves mecàniques sense cap piezoelèctric instal·lat. La visita també serveix per acordar amb el Gabriel Fortuny (responsable de l'operació a GMF) les modificacions necessàries al prototip de cara a la darrera i definitiva prova, la qual es farà amb els piezoelèctrics i el sistema elèctric.

Les modificacions acordades són:

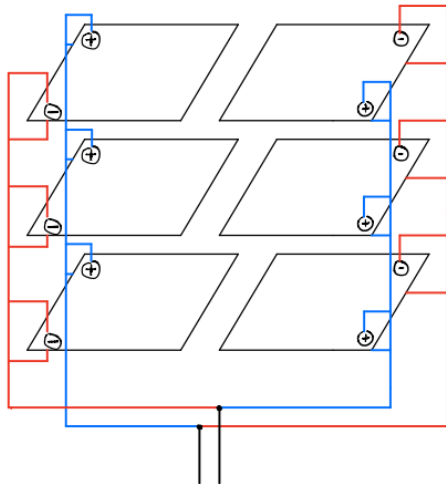
1. Enginyar algun mètode perquè la palanca de sota la biga, no es pugui desplaçar en més direccions que l'habilitada (està lliure).
2. Tensar la cadena que fa de cremallera per a evitar que es desengrani amb el pinyó de l'eix.
3. Pensar algun sistema per a poder alterar la inèrcia del volant (roda de bicicleta) durant les proves.
4. Aconseguir que l'ànima del sistema de generació no tingui moviment horitzontal a causa del moment creat per la dent de la lleva (només desplaçament vertical).

En qualsevol cas, tots aquells que no es puguin realitzar, quedaran com a possibles continuïtats pel futur del projecte.

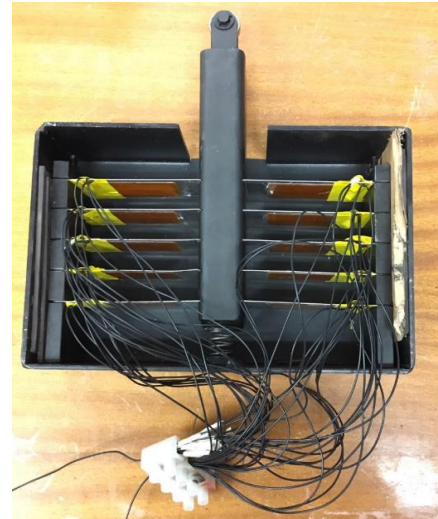
Després de la primera jornada a GMF, es transporta el sistema generador a Terrassa, on es desmunta i se li agrega els piezoelèctrics. Es destina un matí complet en fer aquest procés, que requereix dels passos següents:

1. Desmuntar i treure les platines.
2. Netejar-les amb alcohol.
3. Disposar el cianocrilat (adhesiu) sobre la superfície inferior del piezoelèctric (i esperar al curat).
4. Adherir-ho a la platina amb cura i netejar les restes que surten al comprimir.
5. Mesurar, tallar i pelar els cables elèctrics.
6. Soldar amb estany als contactes del transductor i una vegada sec, enganxar-hi les cintes a sobre per evitar que amb les vibracions la unió es desfaci.
7. Assenyalar els cables amb cinta per assegurar la connexió desitjada i no confondre cables.
8. Tornar a col·locar-les dins la caixa i procedir a la unió de les diferents parts amb regletes.

La connexió és en antiparal·lel, i l'esquema simplificat és:



Il·lustració 78: Disseny de la connexió elèctrica.  
Font pròpia



Il·lustració 79: Execució final del generador.  
Font pròpia

L'associació, és doncs, en antiparal·lel entre transductors d'una mateixa banda, i antiparal·lel també entre ambdós flancs.

La falta de temps i material en aquest punt del treball, obliga a replantejar el sistema elèctric utilitzat, i finalment es pren la decisió de no col·locar cap dels circuits elèctrics rectificadors. Simplement s'analitza els resultats tenint en compte el voltatge cedit pel piezoelèctric i les resistències equivalents (mateix esquema que la il·lustració 65).

Com que es disposa d'un total de 20 piezoelèctrics, la resistència òptima d'aquest circuit és de 230 kΩ i la connexió és en antiparal·lel, la impedància equivalent s'ha de calcular amb la suma d'inverses:

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{20} \frac{1}{230000}} = \frac{230000(\Omega)}{20} = 11,5 \text{ k}\Omega$$



## 8. Resultats obtinguts a la part pràctica

Els assajos s'han pogut efectuar en dos dies diferents, el primer al Campus de Terrassa amb condicions controlades, i el segon i definitiu, a GMF amb el mecanisme complet (i corregit respecte el primer dia) i l'impuls d'un carretó elevador típic de les naus industrials o magatzems.

### 8.1. Condicions controlades a la UPC

Per tal de guanyar temps i aprofitar que es té el sistema generador a Terrassa, es realitza diversos assajos amb un braç hidràulic del laboratori de Resistència de Materials que emula les forces exercides per la lleva a l'ànima.



*Il·lustració 80: Execució del experiment controlat realitzat a la UPC de Terrassa. Font pròpia*

#### 8.1.1. Sol·licitació forçada

En tots els experiments de continuació, s'avalua l'energia recol·lectada en 10 segons mentre el braç hidràulic exerceix la força, per així posteriorment comparar resultats.

- Amplitud 0,1 cm:

1 piezoelèctric, de dalt a l'esquerra (el de la banda superior). Amb resistència equivalent de 230 k $\Omega$  (establerta com a òptima) dividida en una  $R_1=220$  k $\Omega$  i  $R_2=10$  k $\Omega$ .

Taula 23: Energia recol·lectada amb 1 transductor al excitar-lo forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia

Freqüència (Hz)	Voltatge màx. (V)	Potència màx. (W)	Energia recollida (J)
1	0,2438	2,584E-07	1,519E-06
2	0,4830	1,014E-04	5,574E-06
4	0,8740	3,321E-06	1,734E-05
8	1,5180	1,002E-05	5,027E-05
15	2,4380	2,584E-05	9,942E-05

2 piezoelèctrics, corresponents a la platina de dalt a l'esquerra. Amb resistència equivalent de 115,6 kΩ dividida, en una  $R_1=110$  kΩ i  $R_2=5,6$  kΩ. El resultat prové del següent càlcul:

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_2 \frac{1}{230000}} = \frac{230000(\Omega)}{2} = 115 \text{ k}\Omega$$

Taula 24: Energia recol·lectada amb 2 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia

Freqüència (Hz)	Voltatge màx. (V)	Potència màx. (W)	Energia recollida (J)
1	0,1342	1,557E-07	8,630E-07
2	0,2684	6,230E-07	3,211E-06
4	0,5367	2,492E-06	1,237E-05
8	0,9702	8,143E-06	4,172E-05
15	1,7134	2,539E-05	1,114E-04

10 piezoelèctrics, corresponents a les platines de l'esquerra de l'ànima. Amb resistència equivalent de 23 kΩ dividida en una  $R_1=22$  kΩ i  $R_2=1$  kΩ.

$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{10} \frac{1}{230000}} = \frac{230000(\Omega)}{10} = 23 \text{ k}\Omega$$

Taula 25: Energia recol·lectada amb 10 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia

Freqüència (Hz)	Voltatge màx. (V)	Potència màx. (W)	Energia recollida (J)
1	0,1978	1,701E-06	9,608E-06
2	0,3910	6,647E-06	3,662E-05
4	0,7820	2,659E-05	1,366E-04
8	1,6100	1,127E-04	4,742E-04
15	2,4610	2,633E-04	9,908E-04

20 piezoelèctrics, estudiant el global del sistema generador. Amb resistència equivalent de 11,465 kΩ dividida en una  $R_1=11$  kΩ i  $R_2= 465$  Ω.

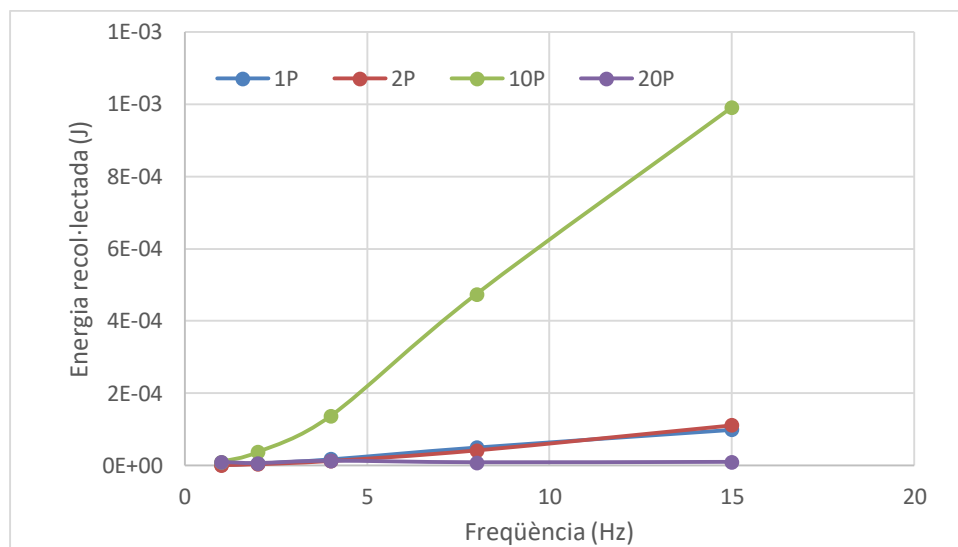
$$R_{eq} = \frac{1}{\sum_{20} \frac{1}{230000}} = \frac{230000(\Omega)}{20} = 11,5 \text{ k}\Omega$$



Taula 26: Energia recol·lectada amb 20 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,1 cm. Font pròpia

Freqüència (Hz)	Voltatge màx. (V)	Potència màx. (W)	Energia recollida (J)
1	0,1208	1,273E-06	9,010E-06
2	0,1405	1,723E-06	6,128E-06
4	0,1479	1,909E-06	1,231E-05
8	0,1159	1,171E-06	8,153E-06
15	0,1381	1,663E-06	9,278E-06

Per assemblar tots els valors obtinguts fins ara en un dibuix, es representa un gràfic de l'energia recol·lectada en funció de la freqüència d'oscil·lació i el número de piezoelèctrics:

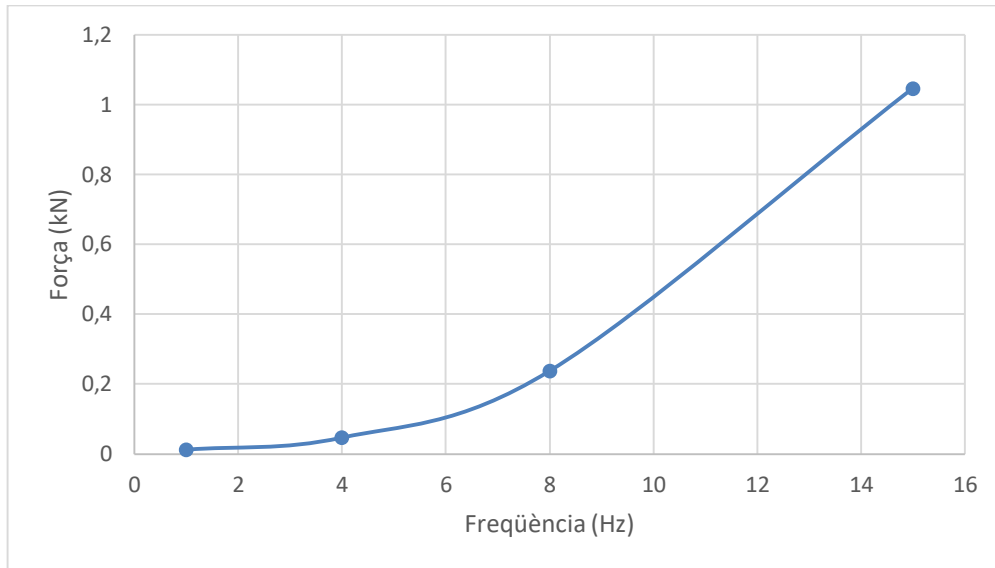


Gràfica 17: Relació entre l'energia recollida, freqüència d'oscil·lació i número de transductors. Font pròpia

De les 4 taules extretes, només se'n poden aprofitar la meitat, concretament la de 1 i 10 piezoelèctrics connectats perquè, tal i com reflecteixen els resultats, les altres configuracions donen valors de potencial sorprenentment baixos. Teòricament, el voltatge hauria de romandre constant en tots els assajos (com a les taules 23 i 25, on són pràcticament iguals), i si això no succeeix, és perquè l'associació no ha estat la correcta o alguns dels pedaços no han actuat correctament.

El major valor aconseguit doncs, és de gairebé 1 mJ en el cas de 10 piezoelèctrics en 15 Hz, i suposadament, amb el global dels dispositius operant bé, l'energia recollida seria el doble (la intensitat es duplicaria).

Es representa també, la gràfica resultant de la força necessària en funció de la freqüència amb la qual l'ànima oscil·la:



Gràfica 18: Representació de la força envers freqüència quan l'amplitud és de 0,1 cm. Font pròpia

D'aquí es pot veure que a mesura que la freqüència augmenta, la força que rep l'ànima per mantenir les condicions, també ho fa, i de manera exponencial. Aquest resultat de força, no són comparables amb els calculats teòricament ja que el braç excitador del taller ha de vèncer la inèrcia de tota la seva massa, i a freqüències tan elevades, no reflecteix la realitat (teòricament=8,86N i pràcticament=1045N).

- Amplitud 0,2 cm:

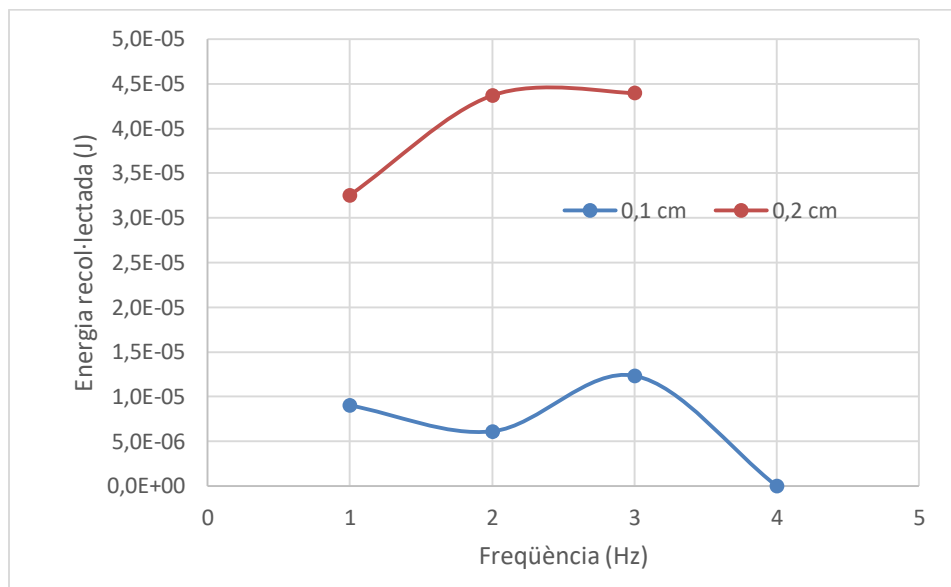
20 piezoelèctrics, estudiant el global del sistema generador. Amb resistència equivalent de 11,465 kΩ dividida en una  $R_1=11$  kΩ i  $R_2=465$  Ω (com en el càlcul anterior).

Taula 27: Energia recollida amb 20 transductors al excitar-los forçadament a una amplitud de 0,2 cm. Font pròpia

Freqüència (Hz)	Voltatge màx. (V)	Potència màx. (W)	Energia recollida (J)
1	0,2564	1,187E-07	3,255E-05
2	0,2959	1,586E-07	4,368E-05
4	0,2959	1,603E-07	4,396E-05

Tot i que en aquest assaig tampoc s'assoleixen els nivells de voltatge esperats, es poden fer servir per comparar-los amb els anteriors, excitats a iguals condicions però a menys amplitud. D'aquesta manera, es pot acceptar la idea que a més amplitud, el voltatge creat pel piezoelèctric i per tant l'energia captada, és major ( $4,396E-05 > 1,231E-05$  a freqüència 15 Hz).

A continuació es presenta la gràfica que mostra la diferència entre les amplituds d'excitació amb 20 piezoelèctrics:



Gràfica 19: Energia recollida en diferents amplituds d'excitació amb 20 transductors. Font pròpia

### 8.1.2. Vibració lliure

Ja que no es disposa de la lleva optimitzada per a dur a terme aquest tipus d'amortització i la maquinària disponible al taller no és capaç d'executar-la, es conclou treure la molla de l'ànima i impulsar el conjunt amb la mà, de la forma més controlada possible (amb l'ajuda d'un regle).

S'efectua un total de 3 avaluacions (totes elles amb la connexió dels 20 piezoelèctrics), dues controlant l'amplitud inicial i reproduint un sol impuls, i l'última, un control qualitatiu on s'impacta l'ànima de forma més o menys regular repetidament.

- Proves amb amplitud inicial ajustada:

Taula 28: Energia recollida en oscil·lació lliure a diferents amplitud per un sol impuls. Font pròpia

Amplitud inicial (mm)	Voltatge màx. (V)	Potència màx. (W)	Temps de damping (s)	Energia recollida (J)
2	0,9098	7,202E-05	2,04	5,287E-06
5	0,9214	7,404E-05	2,76	5,483E-06

Es verifica que a major amplitud, la potència assolida és més gran. Quant al damping mesurat, es pot afirmar que és superior a l'estimat en els càlculs anteriors ( $2,04 > 0,7575$  segons).

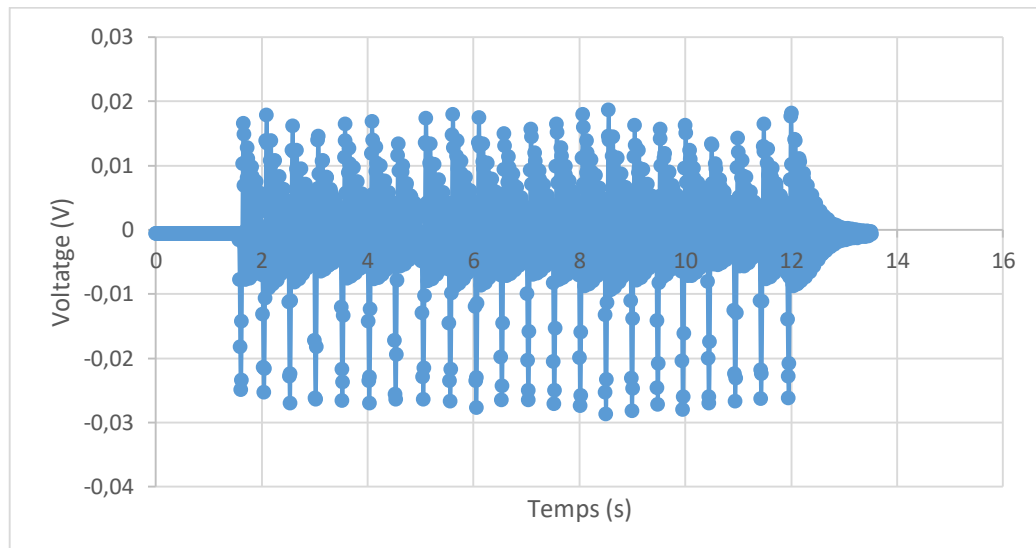
- Prova qualitativa:

Aquest assaig és orientatiu i per veure com reaccionen les platines al ser sotmeses a l'esforç extern abans de que aquestes s'arribin a amortir. Consta de 22 impulsos repartits en menys de 12 segons i en intervals de temps aproximadament iguals:

*Taula 29: Energia recol·lectada en oscil·lació lliure en informe qualitatiu. Font pròpia*

Voltatge màx. (V)	Potència màx. (W)	Temps de damping (s)	Energia recollida (J)
0,4635	1,865E-05	11,95	4,540E-05

A la següent gràfica, es pot veure com es comporten les platines en un cas similar al que hauran de treballar dins el prototip:



*Gràfica 20: Representació qualitativa de l'amortització lliure amb una lleva optimitzada. Font pròpia*

Aquesta seria la forma d'ona que obtindríem en el pas d'un vehicle amb la lleva optimitzada, encara que, entre impactes seria aconsellable esperar una mica més per tal que l'esmortiment fos major.

És destacable que en tots els experiments amb vibració lliure, la flexió es produeix pràcticament en un sentit, i que els voltatges (negatius en aquest cas) són molt menors en un cantó que a un altre (excepte quan la força externa ho obliga). Per tant, es pren la decisió que, de cara als assajos de GMF, la major part de les proves es faran sense la molla de l'ànima, ja que en principi és aquesta la que fa doblegar les làmines tant a un sentit com a un altre; si no genera aquest desplaçament, només consumeix energia a cada cicle per ser comprimida.

## 8.2. Mecanisme complet a GMF

Seguit dels primers assajos realitzats i durant el transport del generador altra vegada cap a l'empresa de Constantí, es pot reconèixer que alguns dels transductors han perdut cables dels seus borns, i després de comprovar-los un per un per saber quins funcionen i quins no, s'arriba a la conclusió que només en queden 10 en plenes funcions. Les soldadures dutes a terme van ser molt complicades i l'estany no va fer l'efecte d'unió esperat, possiblement el salt d'alguns cables va ser degut a petites tensions o estirades mentre es feien les proves. Així doncs, la resistència equivalent òptima utilitzada en tots els assajos és de 23 kΩ.

Tot i això, es decideix mantenir tot el conjunt de platines i piezoelèctrics disposats dins la caixa, però amb els pedaços danyats desconectats perquè no influeixin en els resultats finals.

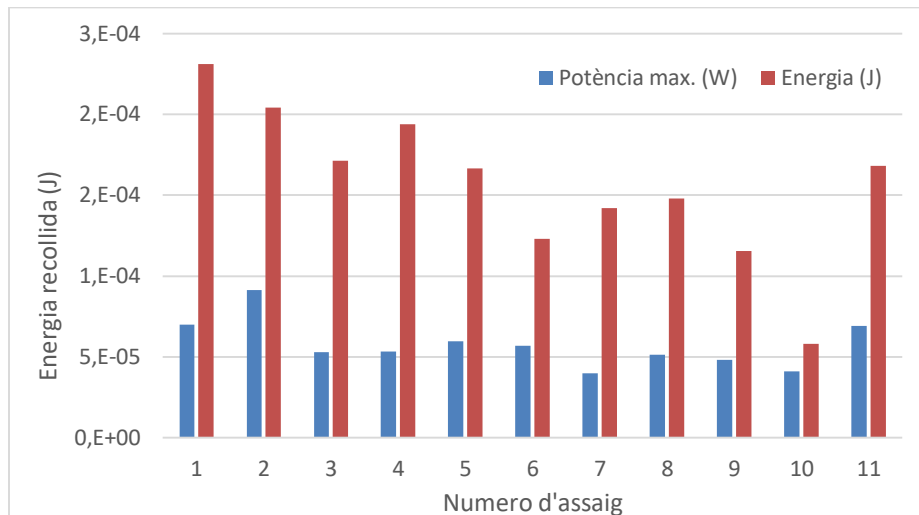
Les fotografies preses durant les jornades a l'empresa tarragonina, abans i després de les modificacions, queden adjuntades al document d'annexes.

L'única possibilitat de poder analitzar el mecanisme amb una vibració amortida lliurament, és extraient la molla de sota l'ànima, però inicialment es deixa el sistema de generació original per a veure com es comporta en oscil·lació forçada:

*Taula 30: Resultats de l'energia del conjunt de proves realitzades amb el prototip final. Font pròpia*

Numero assaig	Molla ànima	Inèrcia del volant	Velocitat d'entrada	Potència màx. (W)	Temps (s)	Energia recollida (J)
1	Sí	Inicial	Lent	6,987E-05	21,16	2,309E-04
2	Sí	Inicial	Ràpid	9,130E-05	11,68	2,041E-04
3	No	Inicial	Ràpid	5,296E-05	11,62	1,712E-04
4	No	Inicial	Ràpid	5,345E-05	15,72	1,937E-04
5	No	Inicial	Ràpid	5,953E-05	11,86	1,667E-04
6	No	Inicial	Lent	5,703E-05	13,40	1,228E-04
7	No	+ 4 peces	Ràpid	3,978E-05	22,84	1,418E-04
8	No	+ 4 peces	Ràpid	5,129E-05	20,42	1,480E-04
9	No	+ 2 peces	Ràpid	4,812E-05	19,56	1,155E-04
10	No	+ 2 peces	Lent	4,096E-05	13,48	5,788E-05
11	No	Inicial	Molt lent	6,930E-05	17,50	1,683E-04

Encara que els valors de voltatge generats pels piezoelèctrics són força més baixos (pràcticament la meitat) que els obtinguts en els primers experiments fets a Terrassa (probablement han patit pèrdues de les seves propietats), d'aquesta taula i el següent gràfic, podem extreure diverses conclusions:



Gràfica 21: Relació de l'energia recollida i la potència màxima assolida en cadascun dels assajos. Font pròpia

- En les condicions preestablertes del prototip, és on s'aconsegueix més energia.
- Entre els dos primers experiments només es diferencia la velocitat d'entrada, i tot i que el pic de potència màxima s'aconsegueix quan el vehicle va ràpid, l'energia recollida és major quan la velocitat d'entrada és baixa, ja que dona temps a les platines a esmorteir-se després del pas de les rodes davanteres i temps de generació és més gran.
- Contràriament al que es pensava, l'extracció de la molla no augmenta els Joules aportats pels transductors, és més, hi provoca un descens. Possiblement hagi afectat l'efecte explicat a la pàgina 77 (amb les seves il·lustracions). Es buscava reproduir d'una manera aproximada la vibració lliure, però sense la introducció de la lleva amb dents triangulars, el sistema ha quedat incomplet i els resultats han decaïgut.
- Armar la roda de bicicleta amb més pes per augmentar la inèrcia, ha significat un ascens en el temps de gir del sistema, però no ho ha fet així amb l'energia recollida. Es pretenia aprofitar al màxim el pes del toro mecànic, però la disminució de l'acceleració angular de l'eix ha induït a una baixada del potencial creat.
- La freqüència màxima assolida per l'ànima és de 10 Hz, i el voltatge més alt enregistrat (en el segon assaig) és de 1,5533 V. El primer paràmetre es calcula agafant 2 pics inicials i consecutius, i analitzant el temps que es tarda en passar d'un a l'altre.
- Els voltatges poden haver caigut després de la segona prova perquè se li posa oli lubricant al boló que fixa el braç de palanca (una de les correccions respecte el primer dia) amb l'objectiu de minimitzar el fregament, però s'observa als successius experiments que la manca de fricció provoca un desplaçament horitzontal i a vegades, un empitjorament en la transmissió del moviment entre la cadena i l'engranatge.

Després d'haver finalitzat la darrera jornada a GMF, aquests envien les dades actualitzades amb les quals s'han dut a terme els experiments definitius (petites modificacions respecte el sistema mecànic inicial): la variació del pes del vehicle (inicialment era un cotxe), les distàncies dels braços de la palanca, el radi del pinyó petit utilitzat, la llargada de la biga i les inèrcies del sistema transmissor.

A partir dels nous valors, es calcula l'energia que té el toro mecànic abans de comprimir les molles, i es compara amb l'energia total recollida en el seu pas.

A partir d'aquí, es calcula l'eficiència total entre l'energia captada per la biga (deguda al pes del vehicle) i l'energia que arriba al circuit elèctric amb els valors finals utilitzats a GMF:

Es considera que l'única energia de l'elevador mecànic que influeix en el procés de captació, és la potencial, que com se sap, té com a fórmula:

$$E_p = m \cdot g \cdot \Delta h$$

$$E_p = 2000(kg) \cdot 9,81 \left(\frac{m}{s^2}\right) \cdot 0,01(m) = 196,2 J$$

I s'agafen altra vegada els resultats obtinguts en les proves definitives, en aquest cas, l'energia més gran i la més petita recol·lectades per saber el rang de l'eficiència.

$$Energia\ més\ alta\ registrada = 2,309 \cdot 10^{-4} J$$

$$Energia\ més\ baixa\ registrada = 5,788 \cdot 10^{-5} J$$

Per calcular el percentatge final, tant sols s'ha de dividir aquestes energies obtingudes:

$$eficiència = \frac{energia\ enregistrada\ de\ sortida}{energia\ potencial\ d'entrada} \cdot 100$$

$$eficiència\ màxima = \frac{2,309 \cdot 10^{-4}(J)}{196,2(J)} \cdot 100 = 1,177 \cdot 10^{-4} \%$$

$$eficiència\ mínima = \frac{5,788 \cdot 10^{-5}(J)}{196,2(J)} \cdot 100 = 2,950 \cdot 10^{-5} \%$$

Aquest valors obtinguts, són una mica més baixos que els obtinguts en les condicions controlades, fet que no sorprèn ja que en el prototip real, les forces de fregament entre elements mecànics són coneguts.

## 9. Resum del pressupost

A continuació es realitza el desglossament del pressupost total per a poder dur a terme el treball present. S'efectua una estimació factorial, basant-se en els coneixements dels principals ítems i en els costos de projectes anteriors. (42)

Recollint tots els costos, el desenvolupament final del projecte és:

*Taula 31: Costos finals del projecte. Font pròpia*

<b>Recursos humans</b>	Personals	7500
	Operaris	6000
<b>Recursos materials</b>	Mecànica	7000
	Elèctrica	12,54
	Adhesió	1276,65
<b>Altres recursos</b>	Software tecnològic	2750
	Desplaçaments	428
		<b>24967,19</b>

Segons les dades recollides i les estimacions dutes a terme, el preu final del projecte està al voltant dels 25000 euros.



## 10. Conclusions i propostes de millora

Per concloure aquest projecte, s'ha de dir que en termes generals s'ha assolit els objectius principals ja que, s'ha estudiat tot el prototip dissenyat, calculant paràmetres bàsics per estimar els resultats futurs, s'ha optimitzat teòricament elements com la palanca, el volant d'inèrcia i la lleva (raonant els motius de cada modificació), s'ha amplificat les opcions de millora, ja sigui amb els materials seleccionats o modificació de formes. I per últim, s'ha conformat l'artefacte a l'empresa GMF amb el qual s'ha efectuat un seguit d'assajos que han proporcionat valors reals d'energia recollida.

De la mateixa manera, s'ha continuat amb la recerca i optimització de la part elèctrica, on s'ha aportat noves idees pel control intel·ligent del commutador i el càlcul teòric dels elements principals per fer treballar cada circuit en condicions òptimes.

Per altra banda, i en un cas més desfavorable, ha estat una llàstima no poder aprofitar més el mecanisme facilitat per l'empresa de Comsa; l'execució depenia completament d'ells i fins el moment final, el projecte ha estat totalment teòric i amb dubtes sobre si es duria a terme l'experiment pràctic. Aquesta mala planificació no ha permès introduir cap circuit rectificador dels estudiats, i millorar l'eficiència final. Degut a la falta de temps i material, tampoc ha estat possible modificar la gran part de les millores proporcionades (només el canvi de la inèrcia del volant), amb lo qual, la comparació entre el prototip inicial i l'optimitzat no s'ha pogut estudiar.

Tot i això, des de la universitat, s'ha procurat aprofitar el temps d'assemblatge dels piezoelèctrics amb les platines, per analitzar el comportament d'aquests materials sota diferents condicions controlades (com ja s'ha explicat a la memòria).

Centrant-nos en els resultats tècnics obtinguts durant la memòria (tant teòrics com pràctics), s'extreuen varies conclusions que a continuació s'argumenta.

Del sistema mecànic teòric, probablement l'apartat on s'ha dedicat més esforç conjuntament amb les optimitzacions proposades, els resultats han estat:

- Força rebuda per la biga  $F_1=4905$  N
- Força necessària per moure la biga  $F_2=2486$  N
- Desplaçament vertical de la biga  $d_1=2,26$  cm
- Constant de les 4 molles  $k_1=5,643$  kN/m
- Relació dels braços de palanca:  $l_1=0,31$  m i  $l_2=1,5$  m
- Desplaçament del braç dret de la palanca  $d_2=10,94$  cm
- Radi del pinyó utilitzat  $r=2,65$  cm
- Velocitat angular del sistema transmissor  $w=22,94$  rad/s
- Numero de dents de la lleva  $n=8$
- Distància total recorreguda per l'ànima del sistema generador  $d=4$  mm
- Constant de la molla de l'ànima  $k_2=1,25$  kN/m

- Freqüència vibració de les platines  $f=29,21$  Hz
- Amplitud de vibració de les platines  $A=2$  mm

D'aquests valors es pot destacar que, la força subministrada pel vehicle és, de sobra, més gran que la necessària per moure tot el conjunt i produir electricitat, el desplaçament vertical que patirà el cotxe és mínim per evitar dificultats en la conducció, la relació de palanca permet captar una bona part de la força rebuda per la biga i transmetre-la fins al pinyó. També, que la forma, permet mantenir una amplitud constant i forçada de vibració.

A tot això, se li ha aplicat un conjunt de mesures correctores per tal de treure-li profit a l'invent, i les més importants mereixen ser esmentades. Les diferents accions dissenyades aspiren arribar a la freqüència fonamental de les platines, ja que és en aquest règim on hi ha menors resistències internes, segons els càlculs aquesta és de 68,84 Hz:

- Substituir la vibració forçada per una de lliure amortida amb l'objectiu de fer més eficient la recollida d'energia. Per fer-ho, s'utilitza una lleva amb menor numero de dents i aquestes amb forma triangular. Serà indispensable que ara, l'ànima respecti una certa distància amb el contorn de la lleva inicialment per aconseguir que les platines s'esmoreixin lliure i completament abans de cada cicle.
- L'estimació del damping de les platines és de 0,7575 segons, i tenint en compte la velocitat angular que porta la lleva, no serà possible que hi hagi una amortització completa abans que una altre dent impulsi l'ànima. Per evitar-ho, es pot augmentar el radi de la lleva, utilitzar un altre material més rígid, o augmentar el radi del pinyó.
- Per tal d'aprofitar tota la força externa, s'optimitza la relació de la palanca, obtenint un nou valor de la distància de cada extrem al punt de suport. Aquest valors són:  $l_1=0,146$  m i  $l_2=1,664$  m.
- De la mateixa manera, s'optimitza el volant d'inèrcia. El resultat dona com a solució, treure-li  $0,12$  kg·m<sup>2</sup> d'inèrcia al volant per així obtenir una acceleració angular de l'eix més elevada, i l'ascens de la freqüència.
- Pel sistema elèctric, es calcula els nivells de potència màxims assolits pels circuits SSHI que arriben a valors de 1,579 W en condicions òptimes pels 20 piezoelèctrics. També la introducció d'un "switch" intel·ligent per quadrar els temps de treball d'aquests circuits i no perdre la potència generada.
- Optimització en la implementació a la via de l'artefacte en zones de radar de tram o en carreteres amb ressals de reducció de velocitat, amb l'objectiu que l'excitació sigui el més restringida possible.

Quant a la part pràctica i a les proves realitzades tant a Terrassa com a Constantí, s'arriba a diverses conclusions de les quals algunes ja s'han explicat.

Amb vibració forçada i controlada (al laboratori):

- Les potències màximes i l'energia, augmenten de forma directament proporcional a la freqüència d'excitació en tots els casos, donat que es van apropant a l'estat fonamental i hi ha més flexions per unitat de temps.
- A la connexió amb 2 i 20 transductors, els voltatges obtinguts són rarament baixos (sobretot l'últim) i per tant l'energia recollida cau en picat. Això pot ser degut a que algun dels pedaços hagi perdut un dels cables del seu born o no faci bon contacte, i la combinació entre ells s'anul·li.
- La major energia recollida en un rang de 10 segons, és de  $9,908 \times 10^{-4}$  J amb 10 piezoelèctrics connectats.
- La força que ha de fer el braç hidràulic és directament proporcional a la freqüència, ja que la pròpia inèrcia de les platines i l'ànima, dificulta la flexió.
- Es verifica que a més amplitud, major voltatge creat, tal i com estipulen les propietats intrínseques d'aquest tipus de materials.
- Es desestima el càlcul teòric del damping, ja que els experiments determinen un temps d'esmortiment al voltant dels 2 segons.
- Sense haver fet les proves pràctiques en les condicions desitjades, es manté la idea de que amb la vibració amortida lliurement s'arribaria a recollir més energia perquè, amb la mateixa força externa, es produiria el mateix nombre d'impulsos a l'ànima però amb temps més distants, i d'aquesta manera s'aprofitaria totes les flexions creades.

Dels assajos amb el prototip complet a GMF:

- Els valors d'energia més alts recollits ( $2,309 \times 10^{-4}$  J i  $2,041 \times 10^{-4}$  J) són amb les condicions inicials preestablertes.
- Que s'assoleixi el pic més elevat de tensió, no és sinònim d'obtenció màxima d'energia, donat que també s'ha de tindre en compte el temps que el sistema segueix generant.
- Contràriament al que es pensava, l'extracció de la molla no augmenta l'energia aportada pels transductors, és més, hi provoca un descens.
- Armar la roda de bicicleta amb més pes per augmentar la inèrcia, ha significat un ascens en el temps de gir del sistema, però no ho ha fet així amb l'energia recollida.
- La freqüència màxima assolida per l'ànima i el voltatge més alts enregistrats són de 10 Hz i 1,5533 V respectivament.

Un altre terme important a tractar i amb el qual s'ha intentat perfeccionar el prototip, és l'eficiència. Augmentar aquest percentatge és vital per poder arribar a transformar més quantitat d'energia mecànica en elèctrica. Els dies finals abans de l'entrega se n'ha fet un petit estudi, i les conclusions són:

- Es compara l'energia requerida per deformar les platines, amb la recollida pels piezoelèctrics; aquesta primera, s'obté calculant l'àrea que queda sota la

corba de la gràfica de la força en funció del desplaçament. El resultat obtingut avaluat amb 2 mm d'amplitud és, que amb la vibració lliure, l'eficiència arriba gairebé al 0,01% (9,73E-03%), mentre que en l'excitació forçada és del 5,99E-04%. Es corrobora a la part pràctica, els arguments explicats durant la memòria.

- Els resultats d'eficiència mínima i màxima (generals) són respectivament 2,95E-05% i 1,18E-04%.

Els últims valors actualitzats (del prototip executat finalment), són introduïts a la fulla d'*Excel* (situada a l'últim punt dels annexes) que s'havia fet servir a la part teòrica, i es comparen amb els resultats obtinguts a la part pràctica. Es pot afirmar que els càlculs són un èxit ja que, com s'ha explicat, experimentalment la freqüència més elevada és de 10 Hz i, segons la metodologia descrita l'*Excel*, aquesta hauria de ser de 10,58 Hz, un error realment petit tenint en compte la quantitat de suposicions que s'ha pres.

Quant a les propostes de futur, ja s'han anat comentant al llarg del projecte, però amb termes generals, els aspectes amb els quals es pot seguir i/o aprofundir són:

- El sistema mecànic s'hauria de perfeccionar, eliminant suposicions i construint o comprant una lleva que compleixi el disseny ja esbossat. Aconseguir un prototip més flexible amb el qual es puguin dur a terme les millores estudiades i analitzar més a fons les condicions on els piezoelèctrics creïn major voltatge.
- Executar els diferents circuits elèctrics exposats, corroborant a la pràctica els valors òptims de cadascun.
- Comprendre el circuit *PKD* per fer possible l'acció d'un interruptor intel·ligent o aportar solucions per poder commutar en el moment exacte de cada flexió.
- Dissenyar el sistema electrònic proposat per tal que el consum diari de la centraleta i els seus sensor sigui mínim.
- Estudiar la implementació a les vies, en termes d'espai, localitat, costos i materials perquè la inversió inicial no sigui un factor restrictiu.

## 11. Bibliografia

### 11.1. Textos i continguts

1. Barbero JM. Piezoelectricidad, ¿Qué es eso? - JM3 Studio [Internet]. 2014 [cited 2019 May 21]. Available from: <https://jm3studio.com/piezoelectricidad-que-es-eso/>
2. Piezoelectricitat - Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure [Internet]. [cited 2019 May 21]. Available from: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Piezoelectricitat>
3. Pérez García MA (ingeniero industrial). Instrumentación electrónica [Internet]. Paraninfo; 2014 [cited 2019 May 21]. 379,380. Available from: [https://books.google.es/books?id=Fb5tBQAAQBAJ&pg=PA379&lpg=PA379&dq=gabriel+lippmann+piezoelectricidad&source=bl&ots=2DBZt10SoU&sig=ACfU3U1jASVSqEWoe8Wtk1WzDcMtESNLrw&hl=ca&sa=X&ved=2ahUKewi\\_zbeOpoLhAhUKWBoKHTWUC8IQ6AEwA3oECACQAQ#v=onepage&q&f=false](https://books.google.es/books?id=Fb5tBQAAQBAJ&pg=PA379&lpg=PA379&dq=gabriel+lippmann+piezoelectricidad&source=bl&ots=2DBZt10SoU&sig=ACfU3U1jASVSqEWoe8Wtk1WzDcMtESNLrw&hl=ca&sa=X&ved=2ahUKewi_zbeOpoLhAhUKWBoKHTWUC8IQ6AEwA3oECACQAQ#v=onepage&q&f=false)
4. ALAEI Z. Power Enhancement in Piezoelectric Energy Harvesting [Internet]. Stockholm; 2016 [cited 2019 May 21]. Available from: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:941980/FULLTEXT01.pdf>
5. Gutiérrez J., Soto J., Restrepo R. Radiología e imágenes diagnósticas [Internet]. 3a ed. 2019 [cited 2019 May 21]. 117 p. Available from: <https://www.radimed.com/pagina/117-Ecografia>
6. Efecto piezoeléctrico. – Ecografía Fácil [Internet]. 2017 [cited 2019 May 21]. Available from: <https://ecografiafacil.com/tag/efecto-piezoelectrico/>
7. Detector de rotura de cristal [Internet]. [cited 2019 May 21]. Available from: [https://www.utcssecurityproducts.es/documentos/catalogos/1091\\_Glassbreak\\_Detection\\_Brochure\\_ES\\_LR.pdf](https://www.utcssecurityproducts.es/documentos/catalogos/1091_Glassbreak_Detection_Brochure_ES_LR.pdf)
8. Talleres Cuenca. inyectoros piezoelectricos [Internet]. 2018 [cited 2019 May 21]. Available from: <http://tallerescuenca.com/inyectores-piezoelectricos/>
9. Javier A, García I. E-STEP: GENERADOR PIEZOELÉCTRICO [Internet]. 2012 [cited 2019 May 21]. Available from: <http://innovadays.epsevg.upc.edu/wp-content/uploads/2014/ponencies/Javier-Ibanez.pdf>
10. Piezoelectric Materials Market Size [Internet]. San Francisco; 2016 [cited 2019 May 21]. Available from: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/piezoelectric-materials-market>
11. Calì R, Bhaskar U, Camboni D. Piezoelectric Energy Harvesting Solutions. Pisa; 2014.
12. Li H, Tian C, Deng ZD. Energy harvesting from low frequency applications using piezoelectric materials. Appl Phys Rev [Internet]. 2014 Dec 6 [cited 2019 May 21];1(4):041301. Available from: <http://aip.scitation.org/doi/10.1063/1.4900845>
13. Gassol Lafarga P. Estudi, optimització i ús aplicat de l'energia elèctrica generada per un sistema mecànic d'excitació d'elements piezoelèctric (Projecte Final de Grau). UPC ESEIAAT; 2018.
14. Cruz Acero M, Esteve J. Energía ambiental (energy harvesting) [Internet]. [cited 2019

- May 22]. Available from: [www.energia2012.es](http://www.energia2012.es)
15. Energy harvesting. 2019 [cited 2019 May 22]; Available from: [https://en.wikipedia.org/wiki/Energy\\_harvesting](https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_harvesting)
  16. Funk J. Energy Harvesting for IoT [Internet]. 2015 [cited 2019 May 22]. p. 38–48. Available from: <https://www.slideshare.net/Funk98/energy-harvesting-for-iot>
  17. Pulido A. La palanca | Aprendemos tecnología [Internet]. 2013 [cited 2019 May 22]. Available from: <https://aprendemostecnologia.org/2013/01/11/la-palanca/>
  18. Denham A. 11 Reasons To Tour With A Pinion Gearbox (And 8 Reasons To Not) [Internet]. 2019 [cited 2019 May 22]. Available from: <https://www.cyclingabout.com/tour-with-a-pinion-gearbox/>
  19. Piñón libre. 2017 [cited 2019 May 22]; Available from: [https://es.wikipedia.org/wiki/Piñón\\_libre](https://es.wikipedia.org/wiki/Piñón_libre)
  20. Prieto Amaya Á. Volante motor: Qué es, qué hace, tipos y funcionamiento [Internet]. 2018 [cited 2019 May 22]. Available from: <https://www.autonocion.com/volante-motor-que-es-funcionamiento/>
  21. volante de inercia. 2018 [cited 2019 May 22]; Available from: [https://es.wikipedia.org/wiki/Volante\\_de\\_inercia](https://es.wikipedia.org/wiki/Volante_de_inercia)
  22. Hernandez Puertas M. PARTES Y FUNCIONAMIENTO DE LEVAS [Internet]. 2014 [cited 2019 May 22]. Available from: <https://prezi.com/trgcykk5amgs/partes-y-funcionamiento-de-levas/>
  23. Partes De Una Leva - Ensayos universitarios - 378 Palabras [Internet]. 2015 [cited 2019 May 21]. Available from: <https://www.buenastareas.com/ensayos/Partes-De-Una-Leva/69150847.html>
  24. docooler piñón velo acero rosca 9 velocidad 13 - 32T Freewheel Engranaje Parts velo: Amazon.es: Deportes y aire libre [Internet]. [cited 2019 May 21]. Available from: <https://www.amazon.es/docooler-piñón-velocidad-Freewheel-Engranaje/dp/B01LNNOCWO>
  25. Gómez Molina Á. Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos (Trabajo Fin de Grado) [Internet]. Escuela Politécnica Superior de Alcalá; 2018 [cited 2019 May 22]. Available from: [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG\\_Gomez\\_Molina\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
  26. Torrecilla KT. Implementación de sensores piezoeléctricos para la generación eléctrica bajo calzada: aplicaciones en el Aeropuerto de Barcelona (Treball Final de Grau) [Internet]. [Castelldefels]: UPC EETAC; 2017 [cited 2019 May 22]. Available from: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/107254/memoria.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
  27. Guillen Moya F. Estudio del circuito de acondicionamiento y almacenamiento de la señal eléctrica generada por un elemento a flexión en función de la excitación mecánica (Proyecto Final de Grado). UPC ESEIAT; 2017.
  28. Lefeuvre E, Badel A, Richard C, Petit L, Guyomar D. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems. *Sensors Actuators A Phys* [Internet]. 2006 Feb [cited 2019 May 22];126(2):405–16. Available from:



<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424705006151>

29. Goudarzi M, Niazi K. Pyroelectric effect in PZT and PMN-0.25PT ceramics for hybrid energy harvesting in different interface circuits. *Ger J Renew Sustain ENERGY Res* [Internet]. 2015 [cited 2019 May 22];1(1):23–39. Available from: [https://www.researchgate.net/publication/275035117\\_Pyroelectric\\_effect\\_in\\_PZT\\_and\\_PMN-025PT\\_ceramics\\_for\\_hybrid\\_energy\\_harvesting\\_in\\_different\\_interface\\_circuits](https://www.researchgate.net/publication/275035117_Pyroelectric_effect_in_PZT_and_PMN-025PT_ceramics_for_hybrid_energy_harvesting_in_different_interface_circuits)
30. Pang S, Li W, Kan J. Optimization Analysis of Interface Circuits in Piezoelectric Energy Harvesting Systems. *J Power Technol* 96. 2016;1–7.
31. Antiparalelo [Internet]. 2018 [cited 2019 May 29]. Available from: <https://es.wikipedia.org/wiki/Antiparalelo>
32. Vera Fernández M. Projecte d'execució d'una prova pilot de generació elèctrica amb elements piezoelèctrics mitjançant el pas de vehicles (Treball Final de Màster). UPC ESEIAAT; 2018.
33. DuraAct and DuraAct Power Patch Transducers Contents [Internet]. 2015 [cited 2019 May 22]. Available from: <http://www.pi.ws>.
34. Schulze D-PB. WHITEPAPER-ENERGY HARVESTING Energy Harvesting Uses the Piezo Effect DuraAct Piezo Transducer Plus Matching Electronics [Internet]. [cited 2019 May 22]. Available from: [www.piceramic.com](http://www.piceramic.com)
35. Cornejo Serrano M del C, Bernadett Villalobos E, Molina Reséndiz S, Gerardo Arreola W. SISTEMA MASA RESORTE CON MOVIMIENTO LIBRE AMORTIGUADO, CASOS: SOBREAMORTIGUADO, CRÍTICAMENTE AMORTIGUADO Y SUBAMORTIGUADO, SU MODELADO Y SOLUCIÓN, CON EL APOYO DE GEOGEBRA. Celaya; 2016.
36. Oscilaciones amortiguadas [Internet]. 2013 [cited 2019 May 22]. Available from: <https://es.slideshare.net/jnicolers/movimiento-subamortiguado>
37. Muñoz J. Vibraciones Forzadas y Resonancia [Internet]. 2014 [cited 2019 May 22]. Available from: <https://prezi.com/l5y47tcwdoyk/vibraciones-forzadas-y-resonancia/>
38. Ortega Olivares J. Estudi i caracterització de la resposta elèctrica d'elements piezoelèctrics davant diferents excitacions (TFG). UPC ESEIAAT; 2017.
39. Abd Ul-Qader H, Wasmi HR. The Effect of Length on Free Vibration Response of Cantilever Beam. 2017 [cited 2019 May 21];7(8). Available from: [www.iiste.org](http://www.iiste.org)
40. Fu H, Yeatman EM. Effective Piezoelectric Energy Harvesting Using Beam Plucking and a Synchronized Switch Harvesting Circuit. *IOP Publ* [Internet]. 2018 [cited 2019 May 22];27(8):6–8. Available from: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aac0ba>
41. Park JJ, Kee-Yi J, Jeong H-Y, Waluyo B. Multimedia and ubiquitous engineering [Internet]. Springer; 2013 [cited 2019 May 22]. 695,696. Available from: <https://books.google.es/books?id=YonHBAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=ca#v=onepage&q&f=false>
42. Macarulla M. Módulo 4: Estimación de costes y evaluación económica de proyectos [Internet]. Terrassa; [cited 2019 May 23]. Available from: [https://atenea.upc.edu/pluginfile.php/2663974/mod\\_resource/content/1/P-Greti-Modulo-04\\_Estimacion\\_de\\_costes\\_y\\_evaluacion\\_economica\\_de\\_proyectos.pdf](https://atenea.upc.edu/pluginfile.php/2663974/mod_resource/content/1/P-Greti-Modulo-04_Estimacion_de_costes_y_evaluacion_economica_de_proyectos.pdf)

## 11.2. Il·lustracions i gràfiques

- [1] <https://www.larepublica.co/infraestructura/infraestructura-energetica-y-energia-sostenible-en-colombia-2253016>
- [2] <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Sensores-piezoelectricos-para-aumentar-la-seguridad-en-carreteras>
- [3] <http://itersnews.com/?p=66448>
- [4] <https://www.alamy.es/foto-pierre-y-jacques-curie-49916382.html>
- [5] <http://www.todociencia.com.ar/1845-nace-gabriel-lippmann/>
- [6] [Gassol Lafarga P. Estudi, optimització i ús aplicat de l'energia elèctrica generada per un sistema mecànic d'excitació d'elements piezoelèctric \(Projecte Final de Grau\). UPC ESEIAAT; 2018.](#)
- [7] [https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA\\_enES837ES837&biw=871&bih=843&tbm=isch&sa=1&ei=TqrZXPTYI7K7gwe4gZJA&q=+piezoelectric+polymersstructure&oq=+piezoelectric+polymersstructure&gs\\_l=img.3...110612.116767..116859...0.0..1.133.1566.19j3.....0....1..gws-wiz-img.....0i19j0i8i30i19.WC6gM-4At3k#imgsrc=o\\_T9tikENDtCfM:](https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enES837ES837&biw=871&bih=843&tbm=isch&sa=1&ei=TqrZXPTYI7K7gwe4gZJA&q=+piezoelectric+polymersstructure&oq=+piezoelectric+polymersstructure&gs_l=img.3...110612.116767..116859...0.0..1.133.1566.19j3.....0....1..gws-wiz-img.....0i19j0i8i30i19.WC6gM-4At3k#imgsrc=o_T9tikENDtCfM:)
- [8] <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12882/Mem%C3%B2ria.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [9] <https://ecografiafacil.com/2017/12/22/8-la-piezoelectricidad/>
- [10] <https://es.slideshare.net/anestesiaudea2012/principios-bsicos-de-ecografa-35291601>
- [11] <http://materiaxxi.blogspot.com/2011/07/propiedades-de-los-materiales.html>
- [12] [https://www.utcssecurityproducts.es/documentos/catalogos/1091\\_Glassbreak\\_Detection\\_Brochure\\_ES\\_LR.pdf](https://www.utcssecurityproducts.es/documentos/catalogos/1091_Glassbreak_Detection_Brochure_ES_LR.pdf)
- [13] <http://tallerescuencia.com/inyectores-piezoelectricos/>
- [14] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/piezoelectric-materials-market>
- [15] <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/smart-materials-market>
- [16] <http://www.noliac.com/tutorials/quasi-static-actuators/different-actuator-designs/>
- [17] <https://aip.scitation.org/doi/full/10.1063/1.4900845>
- [18] <https://www.electronicdesign.com/power/what-piezoelectric-effect>
- [19] [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_ID=10318](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_ID=10318)
- [20] <https://www.avnet.com/wps/portal/us/resources/technical-articles/article/iot/powering-the-internet-of-things-via-energy-harvesting/>



- [21] [https://www.researchgate.net/figure/Demonstration-of-several-kinds-of-methods-for-energy-harvesting-in-wireless-networks\\_fig1\\_316924084](https://www.researchgate.net/figure/Demonstration-of-several-kinds-of-methods-for-energy-harvesting-in-wireless-networks_fig1_316924084)
- [22] <https://atos.net/wp-content/uploads/2018/01/atos-smartfabric-white-paper-1.pdf>
- [23] <https://www.slideshare.net/Funk98/energy-harvesting-for-iot>
- [24] [https://www.incafe2000.com/Esp/Viga\\_UPN](https://www.incafe2000.com/Esp/Viga_UPN)
- [25] [https://www.google.com/search?q=4+muelles&rlz=1C1GCEA\\_enES837ES837&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjIts35mJniAhXNA2MBHfTkAxsQ\\_AUIDigB&biw=871&bih=843#imgsrc=K-upvKSltNUGM:](https://www.google.com/search?q=4+muelles&rlz=1C1GCEA_enES837ES837&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjIts35mJniAhXNA2MBHfTkAxsQ_AUIDigB&biw=871&bih=843#imgsrc=K-upvKSltNUGM:)
- [26] <http://www.educando.edu.do/portal/maquinas-simples/>
- [27] [https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA\\_enES837ES837&biw=871&bih=843&tbm=isch&sa=1&ei=sL\\_ZXMi5Fv3lgwfKolKQCw&q=volante+de+inercia&oq=volante+&gs\\_l=img.1.1.0i67j0j0i67l3j0l5.126245.129406..131814...0.0..0.101.1578.20j1.....0....1..gws-wiz-img....0..0i24.FE\\_k1QdnwRw#imgsrc=KO48apPu\\_FJ6OM:](https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enES837ES837&biw=871&bih=843&tbm=isch&sa=1&ei=sL_ZXMi5Fv3lgwfKolKQCw&q=volante+de+inercia&oq=volante+&gs_l=img.1.1.0i67j0j0i67l3j0l5.126245.129406..131814...0.0..0.101.1578.20j1.....0....1..gws-wiz-img....0..0i24.FE_k1QdnwRw#imgsrc=KO48apPu_FJ6OM:)
- [28] <https://sites.google.com/site/gabrielmecanismos/Home/parte-ii/6---leva>
- [29] [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG\\_Gomez\\_Molina\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [30] [http://www.ecorfan.org/republicofperu/research\\_journals/Revista\\_de\\_Ingenieria\\_Electrica/volumen7/Revista\\_de\\_Ingenier%C3%ADa\\_El%C3%A9ctrica\\_V2\\_N7\\_3.pdf](http://www.ecorfan.org/republicofperu/research_journals/Revista_de_Ingenieria_Electrica/volumen7/Revista_de_Ingenier%C3%ADa_El%C3%A9ctrica_V2_N7_3.pdf)
- [32] [https://www.academia.edu/17522642/A\\_comparison\\_between\\_several\\_vibration-powered\\_piezoelectric\\_generators\\_for\\_standalone\\_systems](https://www.academia.edu/17522642/A_comparison_between_several_vibration-powered_piezoelectric_generators_for_standalone_systems)
- [33] [https://static.piceramic.com/fileadmin/user\\_upload/physik\\_instrumente/files/CAT/PI\\_CAT128\\_E\\_R3\\_Piezoelectric\\_Actuators.pdf](https://static.piceramic.com/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/CAT/PI_CAT128_E_R3_Piezoelectric_Actuators.pdf)
- [34] [https://static.piceramic.com/fileadmin/user\\_upload/physik\\_instrumente/files/TN/P876T0001\\_EN\\_DuraAct.pdf](https://static.piceramic.com/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/TN/P876T0001_EN_DuraAct.pdf)
- [35] [https://static.piceramic.com/fileadmin/user\\_upload/pi\\_ceramic/files/success\\_story/WP\\_pi1068\\_EnergyHarvesting\\_EN.pdf](https://static.piceramic.com/fileadmin/user_upload/pi_ceramic/files/success_story/WP_pi1068_EnergyHarvesting_EN.pdf)
- [36] [https://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador\\_arm%C3%B3nico](https://es.wikipedia.org/wiki/Oscilador_arm%C3%B3nico)
- [37] <https://www.monografias.com/trabajos81/vibraciones-mecanicas/vibraciones-mecanicas2.shtml>
- [38] <https://w3.ual.es/~mnavarro/Tema%205%20Oscilaciones.pdf>

[39] [https://books.google.es/books?id=8sK3CgAAQBAJ&pg=PA44&lpg=PA44&dq=sshi-series+interface+circuit+ELEMENTS&source=bl&ots=MLYV5aBBaV&sig=ACfU3U1F8me7Muj\\_ChMKxdGnQGsj6fTxiQ&hl=ca&sa=X&ved=2ahUKewjPkrvO1fzhAhXQ34UKHYLHD0MQ6AEwC3oECAYQAQ#v=onepage&q=ss&f=false](https://books.google.es/books?id=8sK3CgAAQBAJ&pg=PA44&lpg=PA44&dq=sshi-series+interface+circuit+ELEMENTS&source=bl&ots=MLYV5aBBaV&sig=ACfU3U1F8me7Muj_ChMKxdGnQGsj6fTxiQ&hl=ca&sa=X&ved=2ahUKewjPkrvO1fzhAhXQ34UKHYLHD0MQ6AEwC3oECAYQAQ#v=onepage&q=ss&f=false)

[40] [https://www.researchgate.net/publication/252063450\\_Improved\\_Design\\_and\\_Analysis\\_of\\_Self-Powered\\_Synchronized\\_Switch\\_Interface\\_Circuit\\_for\\_Piezoelectric\\_Energy\\_Harvesting\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/252063450_Improved_Design_and_Analysis_of_Self-Powered_Synchronized_Switch_Interface_Circuit_for_Piezoelectric_Energy_Harvesting_Systems)

[41] [https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-engineering/electrical-and-electronic-engineering/public/optical-and-semiconductor-devices/pubs/fu2\\_2018.pdf](https://www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/faculty-of-engineering/electrical-and-electronic-engineering/public/optical-and-semiconductor-devices/pubs/fu2_2018.pdf)

[42] [https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA\\_enES837ES837&biw=871&bih=843&tbm=isch&sa=1&ei=QaDaXKO\\_KMG21fAPwf6n0A0&q=radar+tram&oq=radar+tram&gs\\_l=img.3..0l2j0i5j30j0i8i30l7.467681.474895..475619...2.0..0.109.2308.30j2.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67j0i30.yDLXHnwa77k#imgsrc=uzfa58AtFhK27M:](https://www.google.com/search?rlz=1C1GCEA_enES837ES837&biw=871&bih=843&tbm=isch&sa=1&ei=QaDaXKO_KMG21fAPwf6n0A0&q=radar+tram&oq=radar+tram&gs_l=img.3..0l2j0i5j30j0i8i30l7.467681.474895..475619...2.0..0.109.2308.30j2.....0....1..gws-wiz-img.....0..0i67j0i30.yDLXHnwa77k#imgsrc=uzfa58AtFhK27M:)

[43] <https://www.silicon.es/ibump-el-baden-que-convierte-en-electricidad-el-paso-de-los-vehiculos-115977>

### 11.3. Taules

{1} <https://www.springmakers.net/es/muelles-standard/muelles-de-compresion/product/1959-muelle-de-compresion-2560018?search=muelle%20de%20compresion%202560018>

{2} <https://www.springmakers.net/es/muelles-standard/muelles-de-compresion/product/4656-muelle-de-compresion-1384?search=muelle%20de%20compresion%201384>

{3} [https://www.academia.edu/17522642/A\\_comparison\\_between\\_several\\_vibration-powered\\_piezoelectric\\_generators\\_for\\_standalone\\_systems](https://www.academia.edu/17522642/A_comparison_between_several_vibration-powered_piezoelectric_generators_for_standalone_systems)

{4} [https://static.piceramic.com/fileadmin/user\\_upload/physik\\_instrumente/files/datasheets/P-876-Datasheet.pdf](https://static.piceramic.com/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/datasheets/P-876-Datasheet.pdf)

{5} <https://www.tme.eu/es/details/mf0207fte-715k/resistencias-metalizadas-tht-0-6w/yageo/mf0207fte52-715k/#>

{6} <https://www.tme.eu/es/details/mf0207fte-2k4/resistencias-metalizadas-tht-0-6w/yageo/>

{7} <https://www.tme.eu/es/details/fyd0h104zf/supercondensadores/kemet/>